

IB 131-2014/075
Detektion von atmosphärischem Eis
aufgrund der Veränderung des
Wärmewiderstandes

Dipl.-Ing. Christian Mendig

Pascal Mindermann



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig

August / 2014

IB 131-2014/075

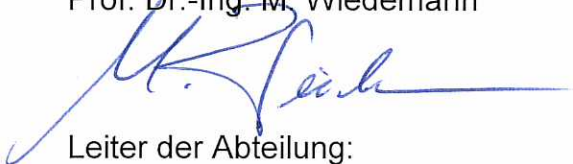
**Detektion von atmosphärischem Eis aufgrund der Veränderung
des Wärmewiderstandes**

Braunschweig, August 2014

Der Bericht umfasst:

116 Seiten

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Leiter der Abteilung:
Dr.-Ing. H. P. Monner



Betreuer:
Dipl.-Ing. Christian Mendig



Verfasser:
Pascal Mindermann





**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft



**Westfälische
Hochschule**

Gelsenkirchen Bocholt Recklinghausen
University of Applied Sciences

Westfälische Hochschule Abt. Bocholt
Fachbereich Maschinenbau

B A C H E L O R A R B E I T

*Detektion von atmosphärischem Eis
aufgrund der Veränderung des Wärmewiderstandes*

Detection of atmospheric ice due to changes in thermal resistance

von

Pascal Mindermann
aus Dorsten

betreut von

1. Betreuer: *Prof. Dr. sc. nat. Tobias Seidl*
Westfälische Hochschule Abt. Bocholt
2. Betreuer: *Dipl.-Ing. Christian Mendig*
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

vertraulich | confidential
Braunschweig, im August 2014

Diese Bachelorarbeit wurde angefertigt am

Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Standort Braunschweig
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

in Kooperation mit der

Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
Institut für Adaptronik und Funktionsintegration

und vorgelegt am 29. August 2014 an der

Westfälischen Hochschule Abteilung Bocholt
innerhalb des Studiengangs Bionik Bachelor of Science
im Fachbereich Maschinenbau.

Sperrklausel

Diese Bachelorarbeit beinhaltet vertrauliche Informationen und Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Die Einsicht, Vervielfältigung oder Veröffentlichung des Inhaltes dieser Arbeit im Gesamten oder in Teilen sowie das Anfertigen von Kopien oder Abschriften, insbesondere in digitaler Form, durch Unbefugte ist grundsätzlich untersagt.

Ausnahmen bedürfen der Genehmigung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in schriftlicher Form.

Confidentiality clause

The present thesis contains confidential information and data aggregated during a research stay at the German Aerospace Center (DLR).

Any inspection, duplication or disclosure of the contents of this work in whole or in part, in particular in digital form, as well as any transcription by any unauthorized party is strictly forbidden.

Exceptions require the permission of the German Aerospace Center in written form.

Kontakt/contact:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Lilienthalplatz 7

D - 38108 Braunschweig

Kurzfassung

Bei einem Flug durch eine mit unterkühltem Wasser angereicherte Atmosphäre kommt es an der Flugzeugoberfläche zu Eisanlagerungen, welche die Flugeigenschaften negativ beeinflussen und Flugzeugkomponenten beschädigen oder ausfallen lassen können. Um dies zu verhindern und so die Flugsicherheit zu gewährleisten, werden Enteisungsmaßnahmen ergriffen, welche auf eine zuverlässige Eiserkennung angewiesen sind.

Im Rahmen der Erforschung und Erprobung alternativer Detektorsysteme wird ein Verfahren zur Bestimmung des thermischen Widerstandes einer Eisanlagerung an einer Grenzfläche vorgestellt. Dazu wird ein Hezelement zusammen mit einem Temperatursensor in eine Flügelvorderkante eingelassen. Über eine Regelung wird die Sensortemperatur konstant gehalten. Bei einer auftretenden Eisanlagerung wird so eine Heizleistungsveränderung gemessen und im Vergleich mit Referenzwerten kann die Anwesenheit des Eises bestimmt werden.

Die Vorteile dieses Detektors sind die bündige Integration in die Flügelvorderkante ohne eine Störung der Umströmung, der geringe Wartungs- und Energiebedarf, die geringe Baugröße und die lokale sowie direkte Messmethode.

Abstract

On a flight through an atmosphere enriched with supercooled water, ice accumulation occurs at the aircraft surfaces, which may adversely affects the flight characteristics and causes damage to aircraft components or let them become inoperative. To prevent this and so to ensure aviation safety, de-icing methods are used, which are dependent on a reliable ice detection system.

As part of the research and testing of alternative detector systems, a method for determining the thermal resistance of a boundary surface's attachment is presented. For this purpose a heating element is introduced into the wing leading edge together with a temperature sensor. A control circuit keeps the sensor temperature constant. When ice forms, heating power changes and compered to reference values, the detector can determine the presence of ice.

The benefits of this detector are the integration into the wing leading edge without any disturbance of the airflow, low power consumption, low maintenance needs, small size, local and direct measurement.

Inhaltsverzeichnis

Sperrklausel / Confidentiality clause	II
Kurzfassung / Abstract	IV
Abkürzungsverzeichnis	IX
Konstantenverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	X
Vorwort	XII
<i>Einführung</i>	1
1. Einleitung	1
2. Zielsetzung	2
2.1. Anforderungsprofil	2
2.2. Anwendungsbereiche	2
2.3. Hypothese	2
3. Grundlagen	3
3.1. Kritische Bereiche	3
3.2. Vereisungsbedingungen	3
3.3. Folgen einer Eisakkumulation	6
3.4. Atmosphärisches Eis	6
3.5. Vereisungsindex	8
3.6. Enteisungsmaßnahmen	8
4. Stand der Technik	9
4.1. Eisdetektoren für den Flugbetrieb	9
4.2. Eiserkennung am Boden	11
4.3. Bewertung bisheriger Systeme	11
4.4. Patente zu Eisdetektoren	12
4.5. Abgrenzung zu anderen Detektoren	13
<i>Konzeptionierung</i>	14
5. Physikalisches Prinzip	14
5.1. Thermische Begriffe	14
5.2. Idealisiertes Modell	15

6. Konzepte	16
6.1. Grundvoraussetzungen	16
6.2. Verwendetes Konzept	16
6.3. Kühlelemente	16
6.4. Sensorposition	17
6.5. Regelung	17
6.6. Wärmeleitfähigkeit	17
6.7. Alternativen zur Heizpatrone	17
7. Ausführungsformen	18
7.1. Simulationsausführung	18
7.2. Anwendungsausführung	19
7.2.1. Heizpatrone	19
7.2.2. Hülse	20
7.2.3. Isolation	20
7.2.4. Flügelvorderkante	21
7.3. Laborausführung / Prototyp	21
8. Funktionsweise	23
8.1. Arbeitsablauf	23
8.2. Positionierung und Systemintegration	25
8.3. Umweltbedingungen	26
Realisierung	27
9. Machbarkeitsprüfung	27
9.1. Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten	27
9.1.1. Abschätzung aus Messungen der NACA	27
9.1.2. Berechnung über die Nußelt-Zahl	29
9.1.3. Messungen im Enteisungsprüfstand	31
9.2. Simulationen zur Machbarkeitsprüfung	32
9.2.1. Variation der Eisdicke	32
9.2.2. Konvektionsabfall	33
10. Signalverarbeitung	36
10.1. Temperatursensor	36
10.2. Heizleistungsregelung	37
10.2.1. Regelkreis	37
10.2.2. Reglereinstellung	38
10.2.3. Regler-VI	39

Erprobung	40
11. Simulation	40
11.1. Bestimmung der Randbedingungen	40
11.1.1. Mikroskopische Vermessung	40
11.1.2. CT-Scan	41
11.2. Simulationstaugliches Modell der Heizpatrone	43
11.3. Simulationstaugliches Modell des Prototypen	45
11.4. Simulation des Prototypen	46
11.4.1. Anfängliche Simulationen	46
11.4.2. Simulation: Variation der Konvektion/Heizleistung	48
11.4.3. Simulation: Oberflächenvergrößerung	50
11.5. Simulationstaugliches Modell der Anwendungsausführung	52
11.6. Simulation der Anwendungsausführung	53
11.6.1. Anfängliche Simulationen	53
11.6.2. Simulation: Variation der Konvektion/Heizleistung	55
11.7. Vergleich Prototyp/Anwendungsausführung	56
12. Eignungsprüfung	58
12.1. Enteisungsprüfstand	58
12.2. Dämpfung des Systems	59
12.3. Temperaturmessung bei variabler Windgeschwindigkeit	59
12.4. Temperaturmessung bei variabler Eisdicke	60
12.5. Heizleistungsmessung bei variabler Temperaturdifferenz	61
12.6. Heizleistungsmessung bei variabler Eisdicke	62
Fazit	64
13. Zusammenfassung	64
14. Ausblick	67
Addendum	A
A. Fertigung	A
A.1. Vermessung der Heizpatronen	A
A.2. Komponenten-Fertigung	A
A.3. Gewichtsbilanz	C
B. Anhang	C
C. Literaturverzeichnis	i
D. Abbildungsverzeichnis	vi
E. Tabellenverzeichnis	vii

F. Benutzte Hilfsmittel	viii
G. Produkte und Lieferanten	viii
H. Eidesstattliche Erklärung	xi

Abkürzungsverzeichnis

AOA	Anstellwinkel θ (<i>Angle of Attack</i>)
CFD	<u>C</u> omputational <u>F</u> luid <u>D</u> ynamics
CT	<u>C</u> omputerized <u>T</u> omography
DLR	<u>D</u> eutsches <u>Z</u> entrum für <u>L</u> uft- und <u>R</u> aumfahrt
EPS	<u>E</u> nteisungsprüfstand
FAA	<u>F</u> ederal <u>A</u> viation <u>A</u> ministration
FDM	Schmelzschichtung (<u>F</u> used <u>D</u> eposition <u>M</u> odeling)
FEM	<u>F</u> inite <u>E</u> lemente <u>M</u> ethode
HDR	<u>H</u> igh <u>D</u> ynamic <u>R</u> ange
HP	<u>H</u> eizpatrone
LWC	Flüssigwasseranteil (<i>liquid water content</i>)
NACA	<u>N</u> ational <u>A</u> dvisory <u>C</u> ommittee for <u>A</u> eronautics
NASA	<u>N</u> ational <u>A</u> viation and <u>S</u> pace <u>A</u> ministration
PID	<u>P</u> roportional, <u>I</u> ntegral, <u>D</u> ifferential
PLA	Polymilchsäure (<i>polylactic acid</i>)
PTFE	<u>P</u> olytetrafluorethylen
PU	<u>P</u> olyurethan
RT	<u>R</u> aumtemperatur
SLD	<u>S</u> upercooled <u>L</u> arge <u>D</u> roplets
TKK	<u>T</u> iefkühlkammer
VI	<u>V</u> irtual <u>I</u> nstrument
WDC	<u>W</u> atchdog <u>C</u> ounter
WK	<u>W</u> indkanal

Konstantenverzeichnis

Zeichen	Parameter	Zahlenwert	Einheit	
ρ	Dichte von Luft, -20°C, 50% Luftfeuchte	1,39402	kg/m ³	[24]
η	dynamische Viskosität von Luft	$1,60701 \cdot 10^{-5}$	Pa s	[24]
c_p	isobare spezifische Wärmekapazität	1005	J/kgK	[3]
c	Schallgeschwindigkeit bei 273 K	≈ 331	m/s	[5]
λ	Wärmeleitfähigkeit von Luft	0,026	W/mK	[23]
$\lambda_{H_2O; -20^\circ C}$	Wärmeleitfähigkeit von Eis bei -20°C	2,4	W/mK	[4]
λ_{Cu}	Wärmeleitfähigkeit von Kupfer	400	W/mK	[23]
λ_{Al}	Wärmeleitfähigkeit von Aluminium	237,5	W/mK	[23]
λ_{Fe}	Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl	13,8	W/mK	[23]
λ_{PTFE}	Wärmeleitfähigkeit von PTFE	0,25	W/mK	[23]
λ_{PU}	Wärmeleitfähigkeit von PU (hart)	0,025	W/mK	[34]
λ_{PLA}	Wärmeleitfähigkeit von PLA	0,29	W/mK	[43]
$\lambda_{MgO; 30^\circ C}$	Wärmeleitfähigkeit von MgO bei 30°C	58,52	W/mK	[39]
$\lambda_{MgO; 0^\circ C}$	Wärmeleitfähigkeit von MgO bei 0°C	42	W/mK	[39]

Symbolverzeichnis

Zeichen	Bezeichnung	Einheit	SI-Einheiten
θ	Anstellwinkel		°
l	Länge		m
L	charakteristische Länge		m
r	Abstands- oder Dickenwert		m
d	doppelter Nasenradius eines Profils		m
s	Entfernung zur Flügelvorderkante		m
s_{stag}	Entfernung zum Staupunkt		m
A	Fläche		m ²
t	Zeiteinheit		s
v	Strömungsgeschwindigkeit		m / s
v_{∞}	Freistrom-Geschwindigkeit		m / s
v_{bl}	Grenzschicht-Geschwindigkeit		m / s
u	Windgeschwindigkeit (Spannung am WK)	V	kg m ² / A s ³
R_{el}	elektrischer Widerstand	Ω	kg m ² / A ² s ³
P_{el}	elektrische Leistung $P = U I$	W	kg m ² / s ³
U	elektrische Spannung	V	kg m ² / A s ³
I	elektrischer Strom		A
φ	Wirkungsgrad		
Q	Wärmemenge	J	kg m ² / s ²
\dot{Q}	Wärmestrom $\dot{Q} = Q / t$	W	kg m ² / s ³
q	Wärmestromdichte $q = \dot{Q} / A$	W / m ²	kg / s ³
λ	Wärmeleitfähigkeit	W / m K	kg m / s ³ K
R_{th}	Wärmewiderstand, thermischer Widerstand	K / W	K s ³ / kg m ²
α	Wärmeübergangskoeffizient	W / m ² K	kg / s ³ K
T	Temperatur		°C
ΔT	Temperaturgradient; Temperaturdifferenz		K
T_{Soll}	Solltemperatur		°C
T_{Sen}	gemessene Sensortemperatur		°C
T_{Sim}	simulierte Sensortemperatur		°C
T_{EPS}	Lufttemperatur im EPS		°C
T_0	Start- und Außentemperatur		°C
T_{offset}	stationärer Anfangsversatz der Temperatur		K
Re	Reynolds-Zahl $Re = v_{\infty} L \rho / \eta$		
Nu	Nußelt-Zahl (<i>Nusselt Number</i>) $Nu = \alpha L / \lambda$		
Pr	Prandtl-Zahl $Pr = \eta c_p / \lambda$		
Ma	Mach-Zahl $Ma = v / c$		
ρ	Dichte		kg / m ³
η	dynamische Viskosität	Pa s	kg / m s

Vorwort

Ich möchte mich ganz herzlich bei Dipl.-Ing. Christian Mendig für die Unterstützung bei der Anfertigung meiner Bachelorarbeit und das in mich gesetzte Vertrauen bedanken. Zudem gilt mein Dank Prof. Dr. sc. nat. Tobias Seidl für die Bereitschaft zur Betreuung meiner Arbeit.

*Es erfüllt mich mit Stolz, dass ich meine Arbeit am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig anfertigen durfte.
Des Weiteren möchte ich das Entgegenkommen meiner Kollegen, die mir im Rahmen meiner Arbeit behilflich waren, hier nicht unerwähnt lassen.*

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern sowie Großeltern für ihren bedingungslosen Rückhalt.

Einführung

1. Einleitung

Eisanlagerungen verursachen in der Luftfahrt ein Sicherheitsrisiko, da sie die Funktionsfähigkeit von Flugzeugkomponenten negativ beeinflussen. Obwohl bereits einige Konzepte zur Eisdetektion bestehen, untersucht das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt im Rahmen der Erforschung der Vereisung von Flugzeugen unter anderem alternative Konzepte zu Detektion von atmosphärischem Eis. Die Detektion bezeichnet hierbei den Nachweis der Anwesenheit des Eises. Diese Bachelorarbeit widmet sich der Frage, ob es möglich ist, über die eisinduzierte Änderung des Wärmewiderstandes im Bereich der Flügelvorderkante eine Eisdetektion durchzuführen. Es handelt sich somit um Grundlagenforschung.

Es wird ein thermisches Messverfahren entwickelt, welches die Wärmeübergangseigenschaften einer Grenzfläche auswertet, die durch den Wärmewiderstand einer dortigen Anlagerung verändert werden. In diesem Fall handelt es sich, bei der thermisch wirksamen Anlagerung, um Eis und bei der zu überwachenden Grenzfläche, um eine Flügeloberfläche eines Flugzeuges. Das Messprinzip ist auf jede Anwendung übertragbar, bei der eine Anhaftung die thermischen Eigenschaften einer beliebigen Grenzfläche verändert und aufgrund dessen detektiert werden soll.

Dazu wird ein Heizelement mit einem Temperatursensor an der Flügelvorderkante positioniert. Die Sensortemperatur wird über eine Regelung der Heizleistung konstant gehalten und bei einer Eisanlagerung verändert sich die benötigte Heizleistung. Im Vergleich zu Referenzwerten kann so eine Eisdetektion unabhängig der Umweltparameter durchgeführt werden.

Neben dem Aufstellen verschiedener Konzepte zu dieser Messmethode, wird ein funktionsfähiger Prototyp entworfen, gebaut und im Enteisungsprüfstand (EPS) getestet. In Versuchsreihen wird überprüft, ob die Präsenz sowie die Dicke des Eises erfasst werden können. Neben dem Prototypen behandelt die Arbeit eine weitere Ausführungsform, die zur hypothetischen Beschreibung des allgemeinen Detektors genutzt wird und nicht den Einschränkungen der Fertigung und dem Zeitrahmen dieser Arbeit unterliegt. Zusätzlich werden numerisch thermische FEM-Analysen an beiden Ausführungen durchgeführt, um deren Leistungsfähigkeit zu ermitteln. Nach der Identifikation der Einflussparameter wird ein Resümee gezogen.

Diese Arbeit gliedert sich im Wesentlichen nach dem Entwicklungsprozess in Konzeptionierung, Realisierung und Erprobung.

2. Zielsetzung

Diese Bachelorarbeit soll die Frage klären, ob es möglich ist die Veränderung des Wärmewiderstandes aufgrund einer Eisanlagerung als Messgröße zur Eisdetektion am umströmten Profil zu verwenden. Da es um die grundlegende Beantwortung dieser Frage geht, ist das Anforderungsprofil dieser Arbeit unabhängig von der Leistungsfähigkeit des entworfenen Detektors. Es handelt sich um eine Grundlagenarbeit.

2.1. Anforderungsprofil

Das Anforderungsprofil der Arbeit lautet:

1. Konzepte aufstellen
2. Überprüfung auf Machbarkeit
3. Eisdetektor als Prototyp bauen
4. Eisdetektor im EPS auf Funktionsfähigkeit prüfen
5. Leistungsmerkmale des Eisdetektors bestimmen
6. Einflussparameter identifizieren
7. Vor- und Nachteile dieser Methode identifizieren

2.2. Anwendungsbereiche

Das in dieser Bachelorarbeit behandelte Konzept zur Messung des Wärmewiderstandes richtet sich in erster Applikation an die Eisdetektion an Flugzeugen. Denkbar sind jedoch alle Anwendungsbereiche, bei denen die Veränderung eines Wärmeübergangs an einer Grenzfläche in Folge einer thermisch wirksamen Anlagerung bestimmt werden soll, ohne die Geometrie dieser Grenzfläche zu verändern. Somit ist das System auch für Helikopter, Schiffe und Fahrzeuge von Belang. Es besteht das Bedürfnis nach einem zuverlässigen, robusten und wartungsfreien Detektorsystem, welches auf strukturfreundliche Weise, nachrüstbar und einfach in das Flugzeug integriert werden kann.

Gedacht ist dieses System zur primären Überwachung einer möglichen Vereisung. Dies bedeutet, dass das System nicht nur eine Kontrollfunktion hat, sondern eigenständig überwacht, um die Besatzung zu entlasten. Vorzugsweise wird es dort eingesetzt, wo durch Vereisungen Sicherheitsrisiken hervorrufen werden, also beispielsweise bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, in geringer Flughöhe und hoher Luftfeuchtigkeit.

2.3. Hypothese

Die thermischen Eigenschaften einer Eisanlagerung verändern den Temperaturgradienten im Detektor so, dass bei konstant gehaltener Sensortemperatur, über die Auswertung einer Heizleistungsveränderung, die Anwesenheit und Dicke des Eises bestimmbar sind.

3. Grundlagen

Nicht nur vor dem Start sollte ein Flugzeug vollständig von Schnee und Eis befreit werden, sondern auch während des Fluges ist eine unbedeckte Flügeloberfläche sicherheitsrelevant, da schon wenige Millimeter Eis die Flugeigenschaften merklich so verändern, dass unkontrollierbare Situationen entstehen können.

3.1. Kritische Bereiche

Neben der Gewichtszunahme kann die Eisanlagerung an funktionsbehafteten Komponenten des Flugzeuges zu Sicherheitsrisiken führen. Besonders gefährdet sind hierbei die sogenannten kritischen Bereiche (Abb. 1), wie in erster Linie Flügelvorderkanten, Propeller- und Rotorblätter. Aber auch Leitwerke sowie Klappen, Triebwerkseinlässe, Windschutzscheiben und externe Sensoren können in Mitleidenschaft gezogen werden.

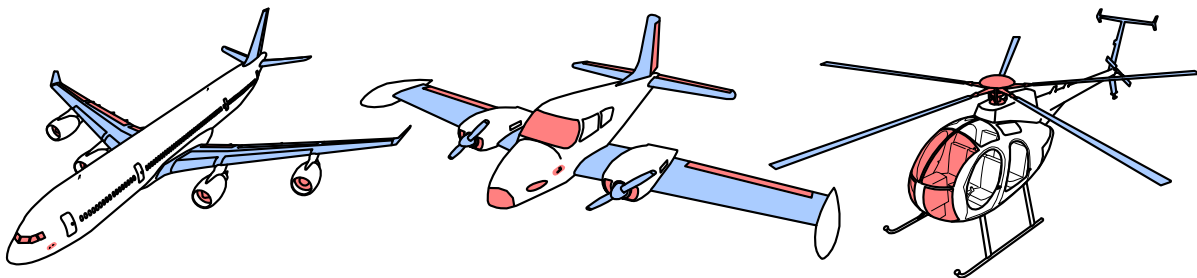


Abbildung 1: Kritische Bereiche der Vereisung (blau), Bereiche mit eisinduziertem Funktionsausfall (rot) je an Strahltriebwerk-, Propeller-Maschinen und Drehflüglern, verändert nach [47]

3.2. Vereisungsbedingungen

Die Vereisung an Flugzeugen wird typischerweise zwischen -20°C und 0°C [49] durch unterkühlte Wassertropfen verursacht, die beim Aufschlagen auf der Flugzeugoberfläche erstarren. Liegt das Wasser bereits vor dem Kontakt mit dem Flugzeug in seiner erstarrten Form vor, ist es für dessen Vereisung unbedenklich [49, 6]. Eine Vereisung kann nur bei subsonischen Geschwindigkeiten ($Ma \ll 1$) auftreten, da beim Überschallflug die Kompression der Luft und die Reibung zwischen Luft und Flugzeugoberfläche zu groß ist, sodass aufgrund der dadurch induzierten Wärmebildung keine Eisansammlung entstehen kann [46]. Zudem muss für eine Vereisung die Temperatur der Flugzeugoberfläche unter dem Gefrierpunkt liegen [6].

Die Eisbildung in einem betrachteten Volumen über einer Oberfläche lässt sich thermodynamisch über die Wärmebilanzgleichung

$$Q_{lat} + Q_{aero} + Q_{kin} = Q_{con} + Q_{evap} + Q_{sens} \quad (1)$$

mit

Q_{lat}	latente Wärme	Wärmegewinn durch erstarrendes Wasser
Q_{aero}	aerodyn. Wärme	Wärmegewinn durch Luftreibung
Q_{kin}	kinetische Wärme	Wärmegewinn durch Kollision von Wassertropfen
Q_{con}	Konvektionswärme	Wärmeverlust durch Konvektion der Luft
Q_{evap}	Evaporationswärme	Wärmeverlust durch Wasserverdunstung
Q_{sens}	sensible Wärme	Wärmeverlust durch den Temperaturunterschied zwischen Wasser und Grenzoberfläche

beschreiben [29]. Vernachlässigt wird hierbei der Wärmefluss, der durch die laterale Wärmeleitung bedingt wird und der Wärmefluss, der aufgrund von Wasser oder Eis, welches das betrachtete Volumenelement über dem Flügelprofil verlässt, entsteht [27]. Die einzelnen Summanden dieser Gleichung können über andere physikalische Größen beschrieben werden [29]. Die wichtigsten Einflussfaktoren werden nachfolgend aufgeführt.

Die Temperatur und der Flüssigwasseranteil (*liquid water content*) (LWC) der Luft sind bezogen auf die Umwelt die Haupteinflussfaktoren für die Vereisung [49].

Eine geringe Temperatur begünstigt den Erstarrungsprozess. Der LWC beschreibt die Masse des Wassers in einem Volumenelement, üblicherweise angegeben in g/m^3 [53]. Bei einem hohen LWC steht dem Vereisungsprozess potenziell eine größere Menge Wasser zur Verfügung.

Der Wolkentyp ist ein Indikator für das Vorhandensein einer bestimmten Tropfengröße. Stratuswolken beherbergen typischerweise kleinere Tropfen als Kumuluswolken [49]. Kleinere Tropfen können von der Umströmung einfacher um das Profil herumgeleitet werden, sodass von der zur Verfügung stehenden Wassermenge nur ein geringerer Anteil aufgenommen wird.

Die Geometrie des Profils bzw. des gesamten Flugzeuges bestimmt den umgebenden Luftstrom grundlegend. Die Fluggeschwindigkeit zusammen mit der Strömungsgeschwindigkeit erhöhen die kinetische Energie des Wassers beim Aufprall.

Der Luftdruck beeinflusst die Fließeigenschaften des Wassers. Die Expositionsdauer gibt den Zeitraum an, in dem Vereisungsbedingungen vorherrschen und eine Eisbildung stattfindet.

Das Risiko einer Vereisung ist temperaturabhängig (Abb. 2). Zwischen -20°C und 0°C tritt die Eisbildung häufig auf [49], unterhalb von -20°C liegt das Wasser nur noch in geringer Konzentration im unterkühlten Zustand vor [49] und deswegen nimmt das Vereisungsrisiko dort ab. Unterhalb von -40°C findet man ausschließlich die erstarrte Form [6] und folglich kann keine Vereisung des Flugzeuges mehr auftreten [49, 6]. Mehr als die Hälfte der Vereisungen tritt zwischen -12°C und -8°C auf [49].

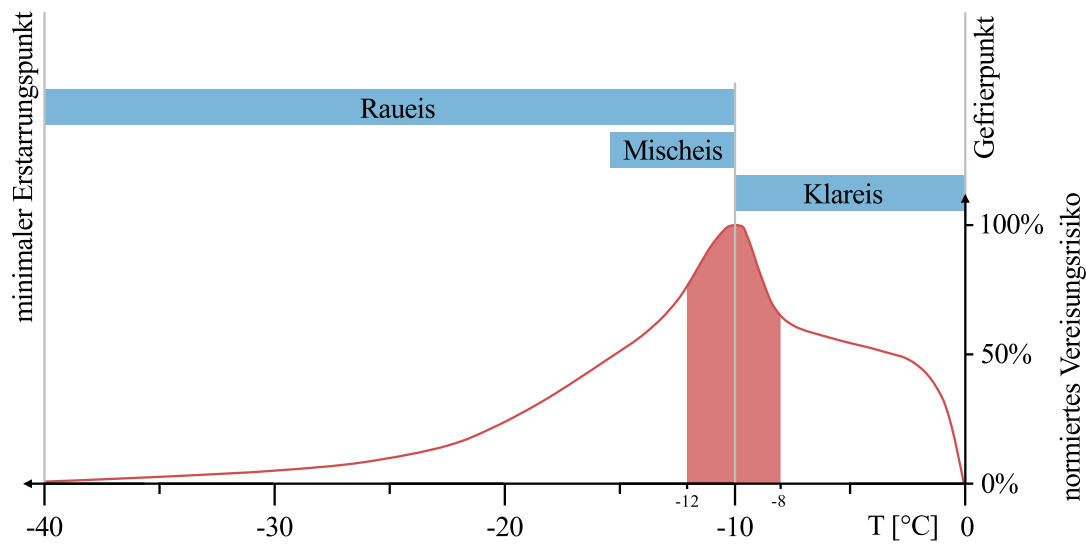


Abbildung 2: Temperaturabhängiges auf das Maximum normiertes Risiko einer Flugzeugvereisung (rot), übliche Erscheinungsbereiche verschiedener Eisarten (blau), verändert nach [29, 46, 49, 51]

Die Temperaturbereiche in denen vorzugsweise Klar-, Misch- und Raueisbildung stattfindet sind maßgeblich von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig (Abb: 3) [29].

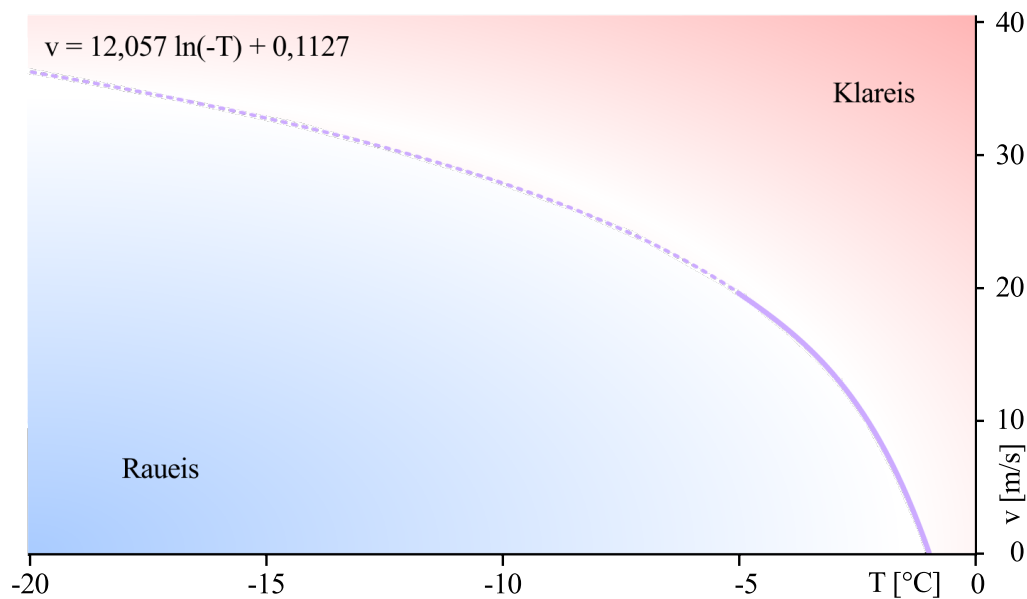


Abbildung 3: Windgeschwindigkeitsabhängiger Grenzverlauf zwischen Rau- und Klareis, ab 19,21 m/s extrapoliert, verändert nach [29]

3.3. Folgen einer Eisakkumulation

Eisanhaftungen an Flugzeugen haben ausschließlich negative Auswirkungen.

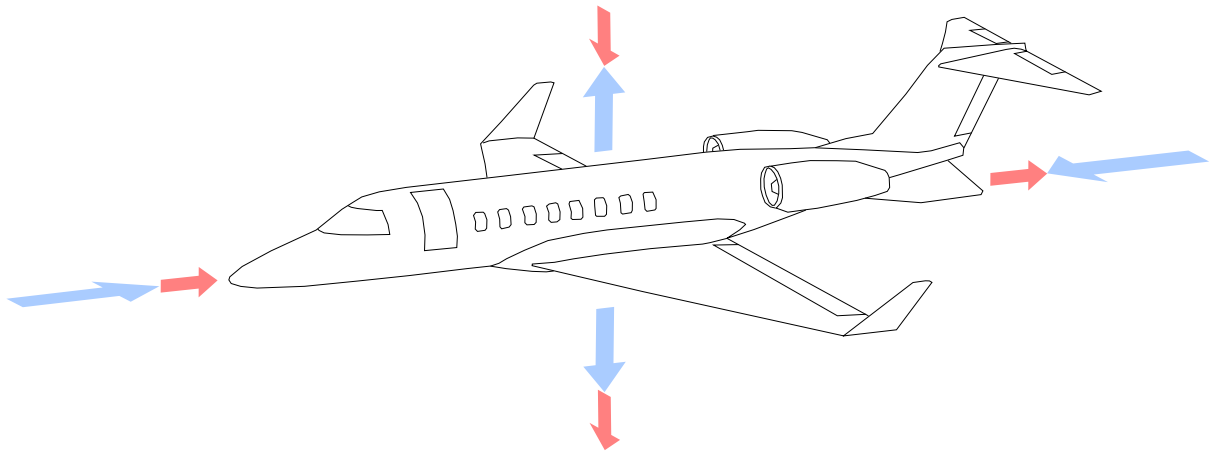


Abbildung 4: Schema der Veränderung der Kraftverhältnisse an einem Flugzeug aufgrund einer Eisanlagerung, Im Uhrzeigersinn vorne beginnend (blau): Widerstands-, Auftriebs-, Vortriebs- und Gewichtskraft, Folgen einer Eisansammlung (rot), verändert nach [49]

Eine Vereisung bewirkt einen Anstieg des Strömungswiderstandes und des Gewichts, wohingegen der Vortrieb und der Auftrieb verringert werden (Abb. 4). Diese Effekte summieren sich auf. Die Folgen sind ein erhöhter Treibstoffverbrauch und somit eine reduzierte Reichweite.

Externe Anbauten, wie beispielsweise Antennen oder Einlässe, können beschädigt und Leitwerke sowie Klappen blockiert werden. Es kann zu einem Sichtverlust bei der Vereisung an Scheiben kommen. Vereisungen an Sensoren können falsche Instrumentenmesswerte hervorrufen. Sich ablösendes Eis kann Aufschlagschäden am Rumpf und an den Triebwerken verursachen.

Um den verringerten Auftrieb zu kompensieren, kann der Anstellwinkel vergrößert werden. Dies vermehrt jedoch die Eisbildung auf der Flügelunterseite, welche dort leichter unentdeckt bleiben kann. [41]

Das Eis stört erheblich die Umströmung der Tragfläche, erhöht so die Abrissgeschwindigkeit und kann das Nickmoment ändern. Eine voranschreitende Eisakkumulation ist gefährlich, weil die Flugeigenschaften schleichend verändert werden und der Pilot das Flugzeug zunehmend begrenzter kontrollieren kann. [41]

3.4. Atmosphärisches Eis

Unterschiedliche Umweltbedingungen (Temperatur, LWC, Tropfengröße, usw.) rufen verschiedene Arten von Eis hervor. Die Beschaffenheit der nachfolgend vorgestellten Eisarten wirkt sich auf die Manövrierfähigkeit eines Flugzeuges aus.

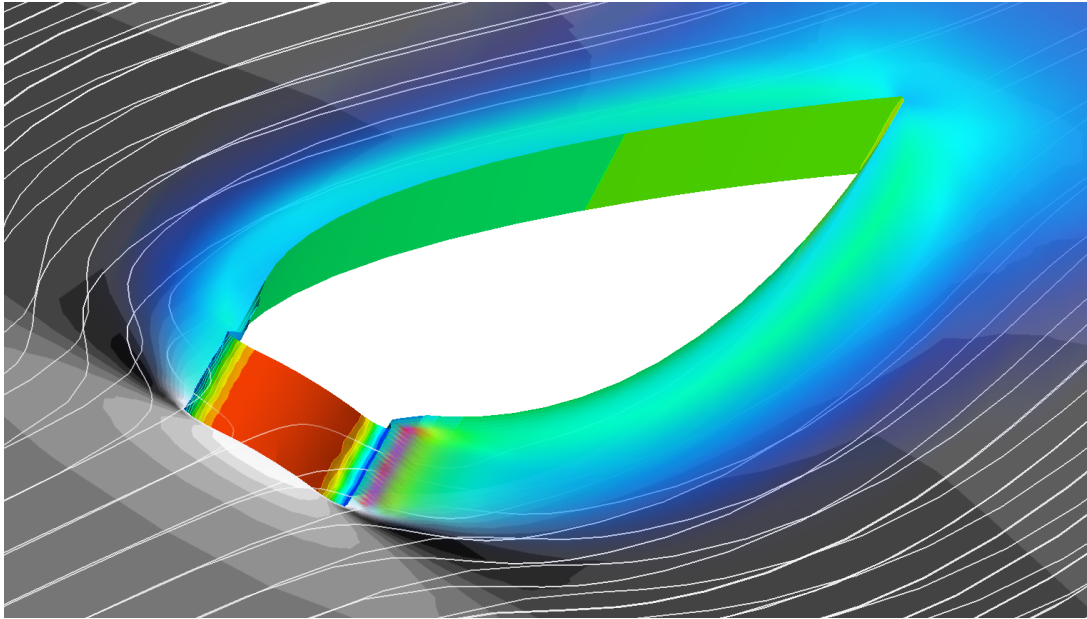


Abbildung 5: Aerodynamische Auswirkung einer beidseitigen Hornbildung bei Klareis
 Grauskala¹: Umgebungstemperatur der Luft | hellgrau: -20°C, schwarz: -21,317°C
 Farbskala auf Profil/Eis: relativer Druck auf Oberfläche | rot: 1247 Pa, blau: -1360 Pa
 Volumenrendering: kinetische Turbulenzenergie | violett: 43,6 m²/s², blau: 0,02128 m²/s²

In einer CFD-Simulation wird ein eisbehaftetes NACA 0012 Profil von 30 cm Länge bei -20°C und einem Anstellwinkel von $\theta = 0^\circ$ mit einem Luftstrom (ideales Gas) von 40 m/s umströmt. An der Vorderseite befindet sich eine Klareisansammlung mit Hornbildung, welche die Strömung turbulent stört und so den Auftrieb reduziert (Abb. 5). Die dargestellten Stromlinien (weiß) befinden sich auf zwei übereinander liegenden Ebenen.

Raeis (*rime ice*) beinhaltet Lufteinschlüsse, welche das Eis weißlich trüb erscheinen lassen [28]. Es hat eine raue Oberfläche und lässt sich aufgrund der Hohlräume einfacher entfernen als Klareis [41]. Der Grund für diese Hohlräume ist, dass das unterkühlte Wasser augenblicklich beim Aufschlagen auf die Oberfläche erstarrt [28]. Es bildet sich bei geringen Temperaturen unterhalb von -10°C [46], einem niedrigen LWC und geringen Geschwindigkeiten und kleinen Tropfen [28]. Seine Dichte beträgt zwischen 0,5 und 0,8 g/cm³ [47]. Raeis taucht etwa dreieinhalb Mal so häufig auf wie Klareis [49].

Weil Klareis (*glaze ice*) langsamer erstarrt, ist es frei von Lufteinschlüssen, somit durchsichtig und weist eine ebene Gestalt auf [28]. Das unterkühlte Wasser legt eine gewisse Wegstrecke auf der Flugzeugoberfläche zurück bis es zur Erstarrung kommt. Dies ist der Grund für die typische Hornbildung, welche zwei- oder einseitig auftreten kann [48]. Diese Hornbildung sorgt für einen drastischen Verlust der Auftrieb erzeugenden Wirkung des Profils (Abb. 5). Seine Festigkeit und Dichte ist mit 0,8 bis 1,0 g/cm³ höher als die von Raeis [47]. Es bildet sich unterhalb des Gefrierpunktes bei Temperaturen über -10°C [46] und hohen Geschwindigkeiten sowie einem hohen LWC und größeren Tropfen [49].

¹ Der weiße Bereich innerhalb des Flügelprofils ist kein Teil des Rechengebietes.

Mischeis (*mixed ice*) weist Merkmale beider obigen Eisarten auf [46]. Typischerweise findet man nahe des Staupunktes Klareis und weiter entfernt Raueis [49]. Die Bedingungen für die Mischeisbildung liegen zwischen denen von Rau- und Klareis [49]. Es tritt auf wenn die Tropfengröße variiert [46] und bildet sich vorzugsweise bei Temperaturen zwischen -15°C und -10°C [46]. Mischeis tritt nur etwa halb so oft auf wie Klareis [49].

Bei run back ice handelt es sich um wiedererstartetes Wasser, welches mittels De-Icing an der Flügelvorderkante aufgetaut wurde, dann am Profil nach hinten läuft und dort wieder erstarrt. Da hier üblicherweise keine Enteisungssysteme verbaut sind, kann es während des Fluges nicht mehr entfernt werden.

Bei der Vereisung von besonders großen unterkühlten Wassertropfen, Supercooled Large Droplets (SLD) mit einem Durchmesser von über $50\text{ }\mu\text{m}$ entstehen Eisanlagerungen mit höherer Rauheit. Große Tropfen werden vor ihrem Aufschlag weniger abgelenkt. Zudem können durch SLDs hervorgerufene Vereisungen an untypische und daher oft ungeschützte Bereiche gelangen. [26]

3.5. Vereisungsindex

Der Schweregrad der Vereisungsrate wird von der Federal Aviation Administration (FAA) in vier Kategorien [26] eingeteilt.

<i>Trace</i>	Kaum sichtbare Vereisungen, die ohne Enteisungsmaßnahmen auf Dauer, also über eine Stunde, ungefährlich sind.
<i>Light</i>	Die Vereisung erfordert auf Dauer gelegentliche Enteisungsmaßnahmen. Es droht keine Gefahr, solange die Gegenmaßnahmen funktionieren.
<i>Moderate</i>	Enteisungsmaßnahmen sind unausweichlich. Kurzzeitige Gefahrensituationen entstehen und daher wird ein Ausweichkurs vorgeschlagen.
<i>Serve</i>	Bei einer Vereisung auf höchstem Grad scheitern die Enteisungsmaßnahmen und ein Ausweichkurs ist unumgänglich.

Diese Einteilung bietet keine quantitative Aussage. Es gibt Bestrebungen die Vereisungsbedingungen mittels meteorologischer Vorhersagen zu kartographieren, um mögliche Gefahrengebiete umfliegen zu können.

3.6. Enteisungsmaßnahmen

Um das Flugzeug eisfrei zu halten, am Boden vor dem Start genauso wie in der Luft beim Flug, gibt es Vorgehensweisen zur Eisentfernung. Diese werden in zwei Kategorien unterteilt.

Das Anti-Icing umfasst alle Vorkehrungen, um die Eisbildung präventiv zu verhindern. Zu den vorbeugenden Maßnahmen zählen vor allem elektrische Heizsysteme für Flügel, Propeller und Scheiben, sowie solche, die die heiße Triebwerksabwärme durch die Flügelvorderkante leiten. Um die Adhäsionswirkung des Eises oder Wassers zu reduzieren, gibt es Beschichtungen zur Oberflächenfunktionalisierung.

Zu dem De-Icing, gehören alle Maßnahmen zur Beseitigung des Eises, die ergriffen werden, wenn bereits eine Vereisung eingetreten ist. Bei den Gegenmaßnahmen werden Heizsysteme und chemische Mittel eingesetzt. Zudem gibt es auch pneumatische Systeme und die Elektro-Impuls-Enteisung, die beide auf mechanische Weise das Eis absprengen. Neben Ausführungen für Flügel, gibt es auch entsprechende Systeme für Propeller und Rotoren.

4. Stand der Technik

Die Problematik der Vereisung und dessen Detektion ist altbekannt [22] und tritt nicht nur in der Luft- und Raumfahrt, sondern auch im Automobilbereich, in der Schifffahrt und in der Meteorologie auf. Straßenheizsysteme und Windkraftanlagen haben ebenfalls den Bedarf nach einer zuverlässigen Eisdetektion.

4.1. Eisdetektoren für den Flugbetrieb

Die Aufgabe eines Eisdetektors ist primär die Anwesenheit von Eis zu erkennen und den Piloten zu warnen. Zusätzlich können manche Systeme die Eisdicke und die Eisbildungsrate bestimmen. Es ist kein System bekannt, welches auch die Art des Eises erfassen kann. Die nachfolgend beschriebenen Eisdetektoren sind vornehmlich für die Anwendung während des Fluges bestimmt.

Bei der Positionierung eines Detektors am Flugzeug sollte vorzugsweise ein möglichst frühzeitig vereisender Bereich überwacht werden, damit der Detektor vor Vereisung der restlichen Flugzeugkomponenten vorzeitig warnen kann.

Man kann die Vereisungsbedingungen über umfassende Messungen aller meteorologischen Umgebungsparameter diagnostizieren oder das Eis über eine physikalische Größe direkt erfassen. Meteorologische Messsysteme werden nachfolgend nicht weiter berücksichtigt.

Pressure Operated Ice Detector Ein zylindrischer Hohlkörper mit integriertem Drucksensor wird am Flugzeugrumpf montiert. Auf der angeströmten Seite befinden sich mehr Löcher als auf der abgewandten Seite, daher ist während des Fluges im Inneren ein erhöhter Druck messbar. Werden durch Eisanlagerungen die vorderen Löcher nach und nach bedeckt, fällt der Druck im Inneren dem entsprechend ab. Durch ein Heizelement kann der Hohlkörper enteist werden. [42]

Serrated Rotor Ice Detector Ein gezahnter Zylinder wird per E-Motor in Rotation versetzt. Auf der der Strömung abgewandten Seite befindet sich ein fixierter Schaber. Bei einer Eisbildung wird durch die Drehbewegung des Rotors das Eis am Schaber abgeschert.

Dabei überträgt sich ein Moment auf die Motorwelle und der dortige Drehmomentschalter aktiviert ein Warnsignal. [42, 50]

Magnetostrictive Ice Detector Ein Probekörper wird per Magnetostraktion in Eigenschwingung von üblicherweise 40kHz versetzt. Bei einer Eisansammlung am Probekörper vergrößert sich dessen Masse und daher verringert sich seine Eigenfrequenz. Diese wird aufgezeichnet und beim Überschreiten eines kritischen Grenzwertes wird ein Warnsignal ausgegeben. Innerhalb weniger Sekunden kann der Detektor thermisch enteist werden, um eine weitere Messung durchzuführen. Typischerweise wird der Detektor vor dem Seitenleitwerk am Flugzeugrumpf angebracht. [50]

Heat of Transformation Ice Detector Hierbei wird ein dünner Platinfilm zyklisch ausgehend von der Umgebungstemperatur auf eine bestimmte positive Temperatur aufgeheizt und kühlt sich dann selbstständig ab. Die Dauer jedes Zyklus wird gemessen. Eine Eisansammlung am Sensor wird bei Überschreiten des Gefrierpunkts geschmolzen und dem System wird die entsprechende Menge an Schmelzenenergie entzogen. Dadurch beansprucht die Heizphase mehr Zeit und die Zyklen werden länger. [50]

Hot Rod Ice Detector Die Vorrichtung wird so am Flugzeug montiert, dass die Besatzung bzw. der Pilot mit dem bloßen Auge überprüfen kann, ob dort eine Vereisung vorliegt. Um einen guten Kontrast aufzuweisen, ist der Detektor matt schwarz lackiert und kann bei Dunkelheit beleuchtet werden. Um die Vereisungsrate zu überprüfen, kann der Detektor beheizt und so das Eis abgetaut werden. Dieses System basiert letztlich auf der Messung der Opazität direkt durch den Menschen. Dies bietet Vorteile bei einem Systemausfall, kann aber bei Klareis zu Erkennungsproblemen führen. [50]

Beta Particle Ice Detector Eine Strontium-90-Quelle sendet Beta-Strahlung aus, deren Intensität per Geiger-Müller-Zählrohr gemessen wird. Eine Eisanlagerung zwischen Sender und Empfänger reduziert die Intensität durch die abschirmende Wirkung. Nachdem ein Warnsignal ausgegeben wurde, wird der Messbereich thermisch enteist. [50]

Ice Detection Light Hierbei handelt es sich um Beleuchtungseinrichtungen, die eine Sichtkontrolle durch die Besatzung bzw. den Piloten erleichtern sollen. Die Flutlichter sind auf die kritischen Bereiche gerichtet. [42]

Fiber Optic Ice Detector Mehrere optische Fasern werden orthogonal unter der transparenten Testoberfläche angeordnet. Ein Teil der Fasern emittiert Licht, der andere Teil leitet eingefangenes Licht zu einem Sensor weiter. Da die Fasern an der Testoberfläche parallel liegen, kann nur bei einer reflektierenden Eisanlagerung Licht den Sensor erreichen. [30]

Piezoelectric Diaphragm Ice Detector Eine dünne Membran, das Diaphragma, wird piezoelektrisch in Eigenschwingung versetzt. Bei einer Eisanlagerung vergrößern sich die Steifigkeit und die Masse des Systems so, dass die Eigenfrequenz steigt. Bei Anlagerungen

von Flüssigkeiten hingegen erhöht sich nur die Masse und die Eigenfrequenz sinkt. Die Frequenzen liegen typischerweise im Bereich um 70 kHz, bei Amplituden kleiner als ein Mikrometer. [50]

Piezoelectric Pulse Ice Detector Ein Piezoelement sendet einen Ultraschall Impuls durch das zu überwachende Bauteil. Nach der einmaligen Anregung fungiert das gleiche Piezoelement ebenfalls als Sensor, welcher das Echo einfängt. Bei einer Eisanlagerung reduziert sich die Intensität der reflektierten Wellen um etwa ein Drittel. Dieses System eignet sich zur Messung von dünnen Eisschichten. Ein ähnliches System mit zwei Piezoelementen ermöglicht zusätzlich eine Dickenbestimmung des Eises durch Separation von Sender und Empfänger. [50]

4.2. Eiserkennung am Boden

Bei Inspektionen am Boden unterstützen diese Systeme [50] die Besatzung bzw. Techniker bei der Eiserkennung, vorrangig bei Klareis. Sie werden nachfolgend auszugsweise vorgestellt.

Bei dem Finnair Ice Detector werden in Strömungsrichtung orthogonal zur Oberfläche halbrunde Platten mit einem horizontalen Streifenmuster montiert. So kann bei einer Sichtkontrolle ebenfalls die Eisdicke durch Abzählen der bedeckten Streifen bestimmt werden. Ein anderes System besteht aus einer auf die Flügeloberfläche geklebte Streifenanordnung. Zwischen den rauen Streifen befindet sich die glattere Oberfläche des Flügels. Mit einem Prüfstab wird quer über die Streifen gestrichen. Ist dabei der Gleitwiderstand konstant befindet sich dort Eis.

Des Weiteren gibt es gelb-rote Aufkleber mit einem mittig befestigten Anhänger. Kann sich dieser frei bewegen liegt kein Eis vor. Solche Aufkleber werden vorzugsweise an den Flügeln aufgebracht.

4.3. Bewertung bisheriger Systeme

Sensorsysteme, die eine Eigenfrequenzveränderung messen, sind heutzutage am weitesten verbreitet [45]. Viele der vorgestellten Detektoren erfüllen zwar ihre Aufgabe, bringen aber auch Probleme oder Unzulänglichkeiten mit sich.

So kommt es zu strömungsungünstigen Anbauten oder zu strukturmechanischen Defiziten beim Anbringen der Sensoren. Zudem können die Meisten dieser Systeme nur bei einer guten Wartung, Reinigung und Instandhaltung zuverlässig funktionieren. Einige Systeme können nicht zwischen Wasser oder anderen ungefährlichen Substanzen und Eis unterscheiden oder sind zu sehr für Verschmutzungen anfällig. Probekörper, die über den Gefrierpunkt erhitzt werden müssen, sind bis zu ihrer Abkühlung nicht einsatzfähig. Außerdem haben viele Systeme einen hohen Energiebedarf, wie beispielsweise der Hot Rot Ice Detector mit 380 W [50]. Systeme, die von der Besatzung selbstständig observiert werden müssen, lenken den Piloten ab und erhöhen dessen Arbeitsauslastung.

4.4. Patente zu Eisdetektoren

Zu Eisdetektorsystemen für die Anwendung an Flugzeugen gibt es eine Vielzahl von Patenten, welche nachfolgend auszugsweise vorgestellt werden. Bei den angrenzenden Patenten handelt es sich um den Heat of Fusion Ice Detector, Heat Transfer Coefficient Ice Detector und den Infrared Ice Detector.

Microwave Ice Detector Auf die zu überwachende Oberfläche wird eine dielektrische Schicht aufgetragen, durch die ein Lichtimpuls im Mikrowellenspektrum geschickt werden soll. Der Lichtimpuls durchwandert die Schicht und wird dabei an beiden Oberflächen reflektiert. Bei einer Eisanlagerung soll die Welle die Beschichtung verlassen, das Eis zusätzlich durchlaufen und an dessen Oberfläche zurückgeworfen werden. So verlängert sich der zurückgelegte Weg des Lichtimpulses. [20]

Electro Optic Ice Detector Hierbei soll eine Lichtschranke im sichtbaren, ultravioletten oder infraroten Spektrum an der Flugzeughülle eingelassen werden und bei einer Unterbrechung ein Warnsignal ausgeben. Das System soll so die Anwesenheit, Dicke und Bildungsrate des Eises bestimmen können. [9]

Reflection Ice Detector Ein Prisma in symmetrischer Trapezform soll mit der längeren Grundseite plan an der Außenhaut angebracht werden. Durch die beiden anliegenden kürzeren Seiten soll ein Lichtstrahlenbündel geschickt werden, welches an der Oberseite reflektiert wird. Eine Eisanlagerung würde den Brechungsindex der Grenzfläche so verändern, dass zwischen Eis, Wasser und typischen Enteisungsmitteln unterschieden werden könnte. [18]

Supercooled Large Droplet Ice Detector Dieser Detektor (Abb. 52) soll aus einem teils freizugänglichen Sensor und einer vorgelagerten gekrümmten Röhre, die den Luftstrom orthogonal umlenkt, bestehen. Dadurch kreuzen sich die aufeinander treffenden Luftströme vor dem Sensor. Aufgrund ihrer Massenträgheit können nur die schwereren SLDs den kreuzenden Luftstrom durchqueren und den Sensor erreichen. [21]

Impedance Ice Detector Zwischen zwei Elektroden wird die Impedanz gemessen, welche sich bei einer dortigen Eisanlagerung ändern soll. Die Elektroden sollen in Form von Patches an eine beliebige Stelle der Außenhaut des Flugzeuges angebracht werden. [13]

Radar Based Ice Detector Mittels eines leistungsschwachen Radarsystems soll durch die Deutung der Reflektion eine mögliche Eisanlagerung erkannt werden. Das System soll außerhalb des Flugzeuges angebracht werden. [10]

Polarisation Ice Detector Unter einem transparenten Sensorfeld soll ein elliptisch polarisierter Lichtstrahl erzeugt werden, der an einer möglichen Eisanlagerung reflektiert wird. Aufgrund der Änderung der Polarisation des reflektierten Lichts, soll die Anwesenheit von Eis erkannt werden. [12]

Electrical Resistance Ice Detector Bei diesem Detektor soll leitfähiges Material an der Flügeloberfläche unter Strom gesetzt werden. Die elektrisch isolierende Eigenschaft des Eises soll bei einer Eisanlagerung eine gebräuchliche Messgröße sein. [14]

Resonance Based Ice Detector Auf der zu überwachenden Oberfläche sollen mehrere Leiterbahnen in einer bestimmten Geometrie ausgelegt und elektrisch angeregt werden. Ein Empfänger zeichnet das Resonanzsignal von jedem Schaltkreis auf. Bei einer Eisanlagerung ändert sich die Resonanz. [15]

Passive Piezoelectric Ice Detector Mehrere piezoelektrische Sensor-Patches sollen an der Innenoberfläche einer Flügelvorderkante aufgebracht werden und als Detektoren fungieren. Die Aufbringung soll in Streifen erfolgen. Durch die passive Betriebsform kann Leistung eingespart werden. Die hier verwendete Messgröße ist die Impedanz. [17]

Heat of Fusion Ice Detector Mit einem kontaktfreien Infrarotsensor soll die Temperatur zwischen einem mit Eis bedeckten und einem unvereisten Bereich verglichen werden. Neben der Temperatur soll auch der Wärmefluss gemessen werden, um die Eisdicke bestimmen zu können. Bei Helikoptern sollen so mit einer Infrarot-Kamera die Rotorblätter beobachtet werden (Abb. 55). Bei einer beginnenden Eisanlagerung bildet sich dort ein Temperaturgradient. Dieser wird optisch erfasst und ausgewertet. [16]

Heat Transfer Coefficient Ice Detector Die einer Wärmepumpe zugeführte Energie soll das Maß für die sprunghafte Änderung der Wärmeübertragungseigenschaften einer Oberfläche sein (Abb. 54). Es soll eine konstante Temperaturdifferenz zwischen Detektor und Umwelt gehalten werden. Der Detektor soll Feststoffe in einem Medium erkennen können und so einen bevorstehenden Phasenwechsel detektieren können. [11]

Infrared Ice Detector Ein Pyrometer soll die von einem Flugzeugbauteil abgegebene Wärmestrahlung auf dessen Innenseite messen (Abb. 53). Die so ermittelten Temperaturwerte sollen im Vergleich mit Referenzwerten die Eisanlagerung diagnostizierbar machen. [19]

4.5. Abgrenzung zu anderen Detektoren

Der deutlichste Unterschied zu bereits bestehenden Inventionen ist, dass dieses hier beschriebene Detektorsystem als Messgröße die geregelte Heizleistung bei einer konstanten Temperatur aufweist und der Wärmetransport im Detektor über Wärmeleitung stattfindet.

Zudem bietet dieses Detektorsystem gegenüber dem Bekannten den Vorteil, dass nicht nur der Übergang von unvereist zu vereist, sondern auch nachfolgend die Isolationswirkung des angelagerten Eises stetig gemessen wird. Während Vereisungsbedingungen herrschen, ist der Detektor zu keinem Zeitpunkt messunfähig. Das Messverfahren ist lokal und direkt.

Konzeptionierung

5. Physikalisches Prinzip

Das hier beschriebene Messverfahren ist geeignet den Wärmewiderstand in einer thermischen Reihenschaltung zu bestimmen, um so eine Aussage über einen Wärmeübergang zu treffen.

5.1. Thermische Begriffe

Der Wärmestrom $\dot{Q} = Q/t$ beschreibt die pro Zeiteinheit t räumlich übertragene Wärmemenge Q , wird dieser auf eine Fläche A bezogen ergibt sich so die Wärmestromdichte $q = \dot{Q}/A$. Der Wärmewiderstand R_{th} beschreibt das Isolationsvermögen und ist formal ein Maß für eine auftretende Temperaturdifferenz ΔT beim Hindurchtreten eines Wärmestroms \dot{Q} durch einen solchen thermischen Widerstand R_{th} . Dies lässt sich über

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{1}{\alpha A} \quad (2)$$

beschreiben. In Reihe geschaltete Wärmewiderstände addieren sich. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist ein Beiwert, der bei einem Temperaturgefälle ΔT an einer Grenzfläche A den Wärmestrom \dot{Q} beziffert. Mit

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T} \Leftrightarrow \dot{Q} = \alpha A \Delta T \quad (3)$$

lässt sich dies darstellen. Die Wärmeleitfähigkeit λ eines Stoffes der Länge l beziffert dessen Durchlässigkeit gegenüber eines Wärmestroms \dot{Q} bei einem anliegenden Temperaturgradienten von ΔT . Formal wird dies über

$$\lambda = \frac{\dot{Q} l}{A \Delta T} = \alpha l \quad (4)$$

beschrieben.

[8]

5.2. Idealisiertes Modell

Das physikalische Modell wird von einer thermischen Reihenschaltung aus Heizquelle, Leitungsmaterial mit Temperatursensor, Eis bzw. kein Eis und der Umgebungsluft gebildet. Das Eis repräsentiert den zusätzlich eingefügten Wärmewiderstand. Das Gebilde sei perfekt isoliert, sodass alle externen Wärmeströme gleich null sind.

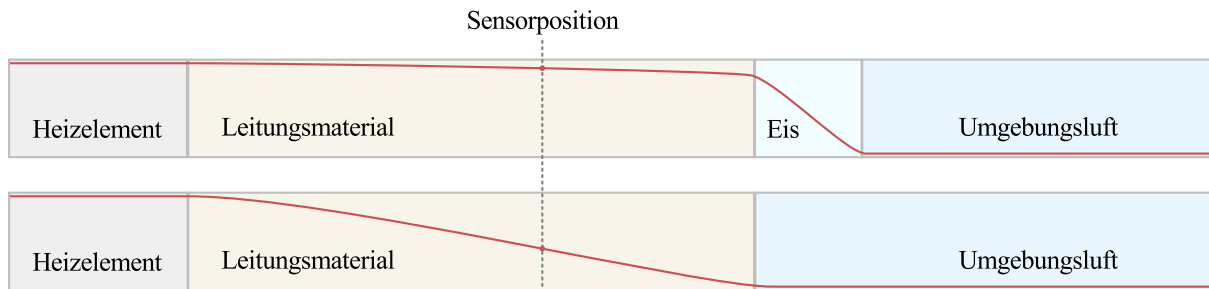


Abbildung 6: Schematischer Temperaturverlauf (rot) der thermischen Reihenschaltung mit (oben) und ohne (unten) Eisanlagerung

Bei einer Anlagerung eines zusätzlichen Wärmewiderstandes tritt eine Temperaturerhöhung im Leitungsmaterial auf, da sich bei gleicher Heizleistung aufgrund unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten der dortige Temperaturgradient verändert. Es ergibt sich für beide Fälle der schematische Temperaturverlauf bei gleicher Heizleistung (Abb. 6). Man erkennt die Temperaturunterschiede an der beliebigen Sensorposition innerhalb des Leitungsmaterials. Die Sensorposition sollte sich in Nähe des Eises befinden, damit der Temperaturunterschied möglichst groß ausfällt.

Falls die Temperatur der Umgebungsluft mit der des Heizelementes übereinstimmt, bildet sich kein Temperaturgradient aus, folglich kann an der Sensorposition kein Temperaturunterschied ausgewertet werden und der Detektor ist vorübergehend funktionsunfähig. Diese Situation muss durch geeignete Wahl der Solltemperatur T_{soll} verhindert werden.

Bei einer Eisanlagerung erhöht sich der Wärmewiderstand zwischen Heizelement und der Umgebungsluft, sodass eine Temperaturerhöhung am Sensor eintritt. Wird diese jedoch von einer Heizleistungsregelung konstant gehalten, fällt die benötigte Heizleistung ab. Dieser Abfall kann genutzt werden, um die Anwesenheit und Dicke einer Eisanlagerung zu bestimmen.

Laut der Gleichung 3 hat neben α auch die Oberfläche einen Einfluss. Da sich diese bei einer Eisanlagerung vergrößert, könnte dies entgegen des Isolationseffektes wirken.

Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine lokale Messmethode. Die Messdaten werden an der Stelle erhoben, an der sich das Eis befindet. Das Verfahren ist direkt, da das Eis über seine physikalischen Eigenschaften gemessen wird und unmittelbar in Wechselwirkung mit dem Detektor steht.

6. Konzepte

6.1. Grundvoraussetzungen

Alle Konzepte eines Detektionsverfahrens, die auf der Messung des thermischen Widerstandes basieren, müssen folgende Komponenten zwingend aufweisen:

- zu überwachende Grenzfläche
- Temperatursensor
- Heiz- oder Kühlelement
- Isolierung vor äußeren thermischen Einflüssen

Um einen Wärmefluss zu ermöglichen, müssen die Komponenten durch eine Form des Wärmetransportes (Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion) untereinander und mit dem Eis in Verbindung stehen. Sonst kann sich kein notwendiger Temperaturgradient im Detektor einstellen. Das Material der Leitungskomponenten sollte eine höhere Wärmeleitfähigkeit haben als die zu detektierende Anlagerung.

6.2. Verwendetes Konzept

Diese Bachelorarbeit fokussiert sich auf Detektoren mit einem geregelten Heizelement. Dieses dient nicht dazu, das Eis abzutauen, sondern als Regelstrecke, um die Sensortemperatur konstant zu halten. Die Sensorposition befindet sich zwischen dem Heizelement und dem Eis.

Um platzsparend und zuverlässig das Heizelement und den Temperatursensor miteinander zu verbinden, wird eine Heizpatrone verbaut. Ein Konzept mit einem Heizelement ist einfacher umzusetzen als eines mit einer Kühlung. Die Sensorposition ist durch die Anforderungen an die Fertigung festgelegt. Die Regelung wurde gewählt, da sie bei der späteren Anwendung ebenfalls nötig ist. Konzepte, die Materialien mit geringen Wärmeleitfähigkeiten verwenden, sind nicht ausreichend sensitiv.

6.3. Kühlelemente

Verwendet man anstelle eines Heiz- ein Kühlelement, muss die Solltemperatur unter der Umgebungstemperatur liegen, da sich der Wärmefluss umkehrt. Das Messsignal würde dann über einen Temperaturabfall generiert.

Von Vorteil wäre, dass die Eisbildung zuerst an der Detektorposition einsetzt. Nachteilig wäre, dass es technischer aufwendiger ist zu kühlen als zu heizen, da die Wärmemenge abgeführt werden muss.

Eine mögliche Umsetzung wäre der Einbau eines Peltier-Elements, welches auf der einen Seite kühlt und auf der anderen die entzogene Wärmemenge abgibt. Diese müsste über Wärmeleitung von der zu überwachenden Grenzfläche weggeleitet werden. Der dazu nötige Wärmestrom muss der pro Zeiteinheit entzogenen Wärmemenge zuzüglich der vom Peltier-Element selbst erzeugten Wärmemenge entsprechen, da sonst eine Erwärmung des Elementes eintreten würde. Denkbar wäre ein Kupferstab, der die Wärme in Richtung der Flügelhinterkante ableitet. Neben der Wärmeableitung hätte man noch die Schwierigkeit den Temperatursensor platzsparend einzubauen.

6.4. Sensorposition

Der Sensor muss nicht zwingend zwischen Eis und Heizelement liegen. Eine Reihenschaltung in der sich das Eis in der Mitte befindet, könnte durch ein Leitungsmaterial in U-Form (Abb. 50) realisiert werden. Es ist jedoch notwendig, dass die Sensorposition auf der Seite des Heizelements liegt, welche in Richtung des Eises weist.

Vorteilhaft bei einer U-förmigen Reihenschaltung wäre, dass mehr Platz für Heizelement und Temperatursensor zur Verfügung stehen würde, da beide räumlich voneinander getrennt wären. Der Nachteil wäre, dass der gesamte Wärmestrom zwischen Heizelement und Sensor über das Eis geleitet werden müsste und dieses dadurch möglicherweise abtaut. Um dies zu verhindern, könnte hier statt eines Heizelementes ein Kühlelement verwendet werden.

6.5. Regelung

Denkbar wären Systeme, bei denen die Temperatur nicht über eine Regelung konstant gehalten wird, sondern die Temperaturabweichung direkt als Messwert dient.

Der Vorteil wäre, dass die Regelung wegfallen würde. Der Nachteil wäre, dass sich, bei einer sich verändernden Sensortemperatur, die Ausbildung des Temperaturgradienten nicht kontrollieren ließe. Daher ist bei veränderlichen Umweltbedingungen eine Regelung notwendig für die Funktion des Detektors.

6.6. Wärmeleitfähigkeit

Theoretisch ist auch eine thermische Reihenschaltung denkbar, in der das Eis keinen Widerstand darstellt, sondern eine höhere Wärmeleitfähigkeit als die Leitungskomponenten aufweist (Abb. 51). Hierbei würde die Eisanlagerung den Wärmewiderstand verringern und bei einem heizenden Konzept, würde der Unterschied der Sensortemperaturen bei einer Eisanlagerung geringer ausfallen. Die geringen Leitfähigkeiten für die Leitungskomponenten eines solchen Detektors, würden die Leistungsfähigkeit des Systems stark einschränken.

6.7. Alternativen zur Heizpatrone

Die Heizpatrone bietet die Möglichkeit ein Heizelement und einen Temperatursensor platzsparend und vorgefertigt zu verbauen. Letztendlich ist jede Wärmequelle tauglich, die gut regelbar ist. Als Heizelement könnte alternativ auch eine Heizmatte zur Wärmeeinleitung genutzt werden.

Die Anforderungen an den Temperatursensor sind, dass er nicht den Wärmefluss signifikant beeinflusst, eine Mindestgenauigkeit bietet und eine geringe zeitliche Verzögerung aufweist. Statt der Temperaturmesswiderstände könnte die Messung mittels Pyrometer realisiert werden.

7. Ausführungsformen

Innerhalb dieser Bachelorarbeit werden drei Entwürfe des Sensors behandelt. Diese drei Ausführungsformen basieren alle auf dem gleichen Konzept, dem eines leistungsgeregelten heizenden Detektors.

7.1. Simulationsausführung

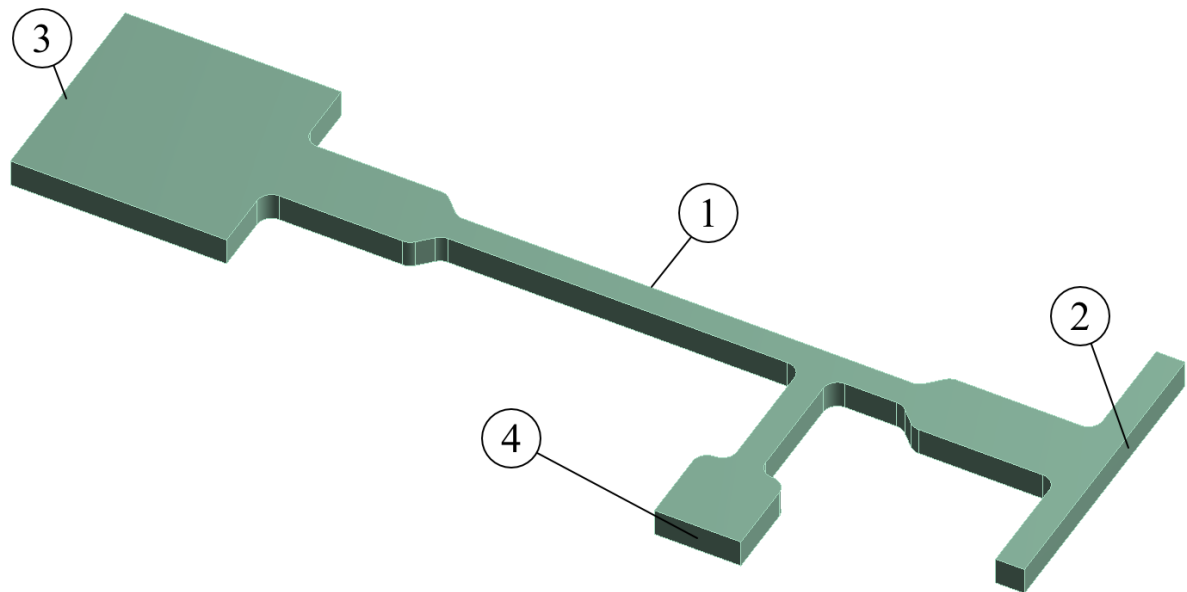


Abbildung 7: Modell der Simulationsausführung

Diese Ausführungsform findet bei den Simulationen auf Machbarkeit Anwendung. Die zur Identifikation der Einflussparameter benötigte Überschaubarkeit ist aufgrund der Einfachheit des Modells gegeben. Das Modell wird auf die grundlegenden wärmeleitenden Bestandteile des Detektors reduziert und die Geometrie wird auf die rudimentärste Form beschränkt.

Da der so entstandene Rechenraum (Abb. 64) eine konstante Dicke aufweist, hat nur die übrige zweidimensionale Form Auswirkung auf den Wärmefluss. Die Form wird maßgeblich von dem dünnen Stab in der Mitte, der sogenannten Lanze (Abb. 7/1), gebildet. Die Verjüngung sorgt dafür, dass der Temperaturgradient gestaucht wird und so besser erkannt werden kann. An der einen Seite befindet sich eine dünnwandige Verbreiterung, um die dort entstehende vergrößerte Oberfläche als Kontaktfläche (Abb. 7/2) mit dem Eis zu nutzen. Die geringe Breite sorgt dafür, dass keine ungewollte Trägheit ins System eingebracht wird. Auf der anderen Seite der Lanze befindet sich eine rechteckige Verbreiterung. Die Hinterfläche (Abb. 7/3) dient der Einleitung des Wärmestroms des simulierten Heizelementes. Bewirkt durch die größere Längenausdehnung dieses Abschnittes entsteht dort ein Wärmepuffer, der besonders bei transienten Simulationen zum Tragen kommt. Die Pufferwirkung muss eingebracht werden, da sie ein nicht zu vernachlässigendes Merkmal des Detektors ist.

Bei einer Wärmestromeinleitung und einer Randbedingung, die dem Eis entspricht, bildet sich ein Gradient zwischen beiden Enden aus. Um immer an der selben Stelle die Temperatur zu messen, die für den Sensor (Abb. 7/4) steht, befindet sich an der Lanze eine Abzweigung mit einer Verbreiterung am Ende. Dort herrscht nahezu die gleiche Temperatur (Abb. 48) und die Stichprobe kann stets gleich angebracht werden.

Das gesamte Gebilde ist mit Ausnahme der beiden Kontaktflächen perfekt isoliert, jedweder Wärmestrom an diesen 44 Flächen ist gleich null. An der einen Kontaktfläche kann zusätzlich ein weiteres Volumenelement angebracht werden, um die Eisdicke zu simulieren. Die Verbindung zwischen den Bauteilen wird bereits beim Erstellen der Zusammenbau-Datei festgelegt.

7.2. Anwendungsausführung

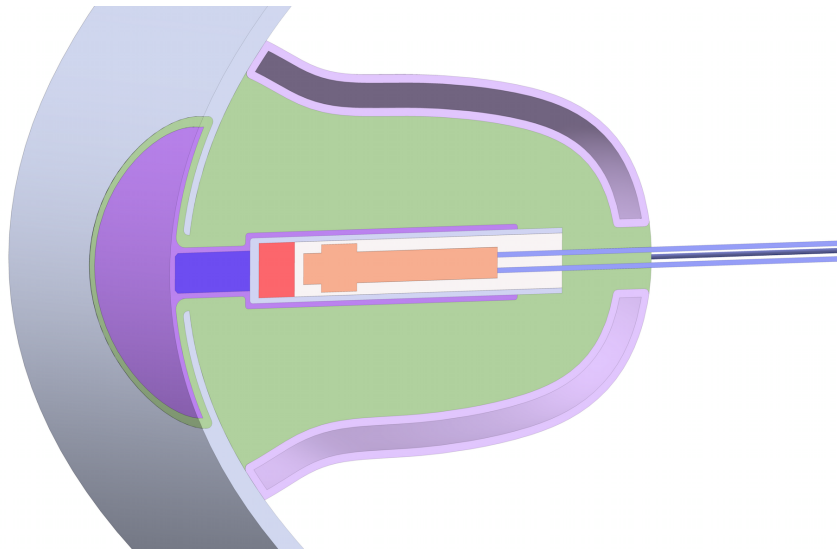


Abbildung 8: Modell der Anwendungsausführung (XZ-Schnitt), vgl. Abb. 49

Die Anwendungsausführung stellt die bevorzugte Variante des Detektors dar. In dem vorgegeben Zeitraum ist diese nicht zu fertigen, dient aber zur Beschreibung des hier verwendeten Eisdetektorkonzeptes. Zu den wichtigsten Merkmalsausprägungen findet sich im Anhang ein morphologischer Kasten (Tab. 3).

Das Modell der Anwendungsausführung wurde hier an ein *NACA 0012* Profil mit 2 m Länge und einer Stärke von 2 mm angepasst (Abb. 8). Der Detektor unterteilt sich in zwei Baugruppen, die Leitungskomponenten (Seite V) und die Isolationskomponenten. Die Leitungskomponenten umfassen alle überdurchschnittlich gut wärmeleitenden Bauteile (Hülse, Heizpatrone) des Detektors, die Isolationskomponenten (Gussform, PU-Isolation) die verbleibenden Bauteile.

7.2.1. Heizpatrone

Die Heizpatrone ist das Herzstück des Detektors, da sich dort Sensor- und Heizelement befinden. Durch Modifikationen an der Heizpatrone lassen sich Heizleistung und Sensitivi-

tät des Detektors ändern. Das Heizelement (orange) fungiert als Wärmequelle. Als Temperatursensor (rot) dient ein Pt100-Messwiderstand in Vierleiterausführung. Der Sensor sollte möglichst schnell reagieren und eine geringe Messabweichung aufweisen. Die MgO-Isolation (beige) in der Heizpatrone schützt vor Kurzschlüssen. Als Umhüllung dient ein Edelstahlmantel (grau).

7.2.2. Hülse

Die Hülse (violett) besteht aus dem Bypass, der Lanze sowie dem Messteller und dient als Adapter zwischen Heizpatrone und Flügelvorderkante. Durch die Form der Hülse lässt sich der Wärmestrom, in Hinblick auf Trägheit und Kontaktfläche mit der Außenwelt, beeinflussen.

Der Bypass hat die Aufgabe eine möglichst große Kontaktfläche für die Klebeverbindung mit dem Heizpatronenmantel bereit zu stellen. Diese darf den Wärmestrom nicht behindern und muss deswegen auf den hinteren Bereich des Heizpatronenmantels verlagert werden. Zusätzlich wird durch den Bypass das Heizelement thermisch stärker an den Messteller gekoppelt.

Die Lanze verbindet den Mantel der Heizpatrone und den Bypass mit dem Messteller. Je geringer der Durchmesser der Lanze, umso kleinere Durchführungslöcher müssen in die Flügelvorderkante eingelassen werden. Für die Leistungsfähigkeit des Detektors ist es wichtig, dass der Wärmefluss zwischen Sensor und Eis möglichst ungehindert ist (Abb. 6). Daher sind kurze Lanzen aus gut leitfähigem Material zu bevorzugen. Bei flacheren Profilen werden längere Lanzen benötigt, welche die Reaktion des Detektors verlangsamen. Zur Verbesserung kann ein Lanzenkern aus höher leitfähigem Material, wie vorzugsweise Kupfer, in die Lanze eingebracht werden.

Der Messteller vergrößert die Wechselwirkungsfläche des Detektors mit der Umwelt und dem Eis. Der Durchmesser bestimmt, ob das System bereits auf punktuelle Vereisungen reagiert und wie sehr die aerodynamischen Umweltbedingungen die Eismessung beeinflussen. Man beachte, dass die Verteilung des Wärmeübergangskoeffizienten auf der Oberfläche des Profils sich in Abhängigkeit der Entfernung vom Staupunkt verändert (Abb. 13). Bei größeren Messtellern reagiert der Detektor erst bei einer großflächigen Vereisung, da kleinere Eisbildungen von den aerodynamischen Bedingungen überschattet werden. Die Krümmung des Messtellers ist von der des Profils abhängig.

7.2.3. Isolation

Die Isolation hat die Aufgabe die Leitungskomponenten vor äußeren thermischen Einflüssen abzuschirmen und bietet Kontaktflächen zur Befestigung an der Flügelinnenoberfläche. Die Hülse und die Heizpatrone müssen vom Flügel thermisch entkoppelt werden, weswegen die Isolation besonders hinter dem Messteller und an der Lanze wichtig ist.

Die Isolation besteht aus PU-Schaum² (grün), welcher von der Gussform (rosa) eingefasst wird. Diese ist eine dichte, luftgefüllte und doppelwandige Schalenkonstruktion, die aufgrund ihrer Form und geringen Wärmeleitfähigkeit selbst über eine Isolationswirkung verfügt. Zur Fertigung dieser komplizierten Geometrie bietet sich ein 3D-Druck-Verfahren an.

Falls es nötig ist, kann zwischen Messtellerrand und Flügelprofil eine Dichtung eingebracht werden, um Substanzen, wie Wasser, Enteisungsmittel oder Fett, am Eindringen in den Detektor zu hindern. Dort tritt die Isolation mit der Umwelt in Kontakt und darf unter den dortigen Bedingungen nicht vorzeitig verschleifen.

Sollte der Flügel mit einer thermischen Enteisungsvorrichtung ausgerüstet sein, kann bei unzureichender Isolierung eine Betriebsstörung auftreten, da sich die thermischen Verhältnisse im Detektor ändern.

7.2.4. Flügelvorderkante

Die Flügelvorderkante (blaugrau), das zu überwachende Schalenelement, dient zur Lagerung des gesamten Detektors. Der Messteller wird bündig in die Flügelvorderkante eingelassen, um die aerodynamische Integrität des Profils nicht zu verschlechtern.

7.3. Laborausführung / Prototyp

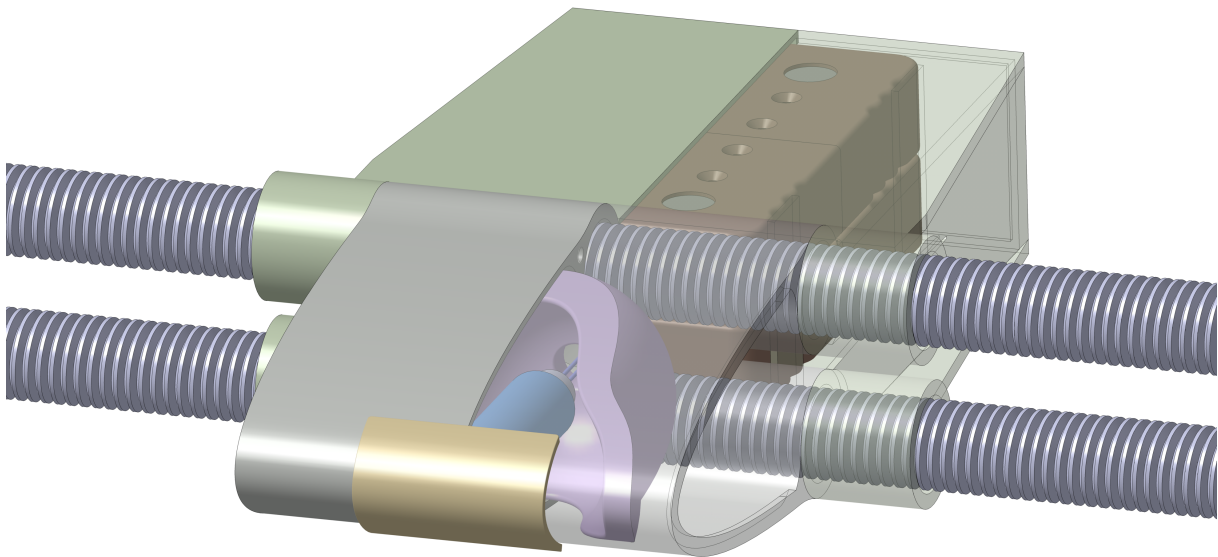


Abbildung 9: Modell der Laborausführung, vgl. Abb. 62

² Die Wärmeleitfähigkeit von Polyurethan beträgt 0,025 W/mK. [34]

Bei der Laborausführung (Abb. 9), auch als Prototyp bezeichnet, handelt es sich um eine einfachere zu fertigende Variante der Anwendungsausführung. Der Prototyp dient den Versuchen im Enteisungsprüfstand. Technische Zeichnungen sind auf den Seiten P bis T hinterlegt. Eine Beschreibung der Fertigung der Laborausführung befindet sich im Anhang im Kapitel A. Ein morphologischer Kasten (Tab. 3) zu den wichtigsten Merkmalsausprägungen findet sich im Anhang.

Ausgangspunkt der Konstruktion bleibt die Heizpatrone, welche mit einer Hülse ohne Lanze ausgestattet wird. Die Heizpatrone hat an der Rückseite keine Schutzschicht gegen Feuchtigkeit. Daher muss bei dem Einsatz in feuchten Umgebungen diese Schwachstelle unbedingt versiegelt werden. Es wird eine Heizpatrone mit einem am Mantelboden befindlichen Pt100-Messwiderstand und einer Heizleistungsverstärkung gewählt. Diese soll die am Pt100 wegfallende Heizleistung kompensieren. Der Pt100 weist eine hohe Genauigkeit auf. Im Verbund mit der Heizpatrone reagiert das Gesamtsystem mit einer geringen zeitlichen Verzögerung auf Temperaturänderungen. Durch die Verwendung der Heizpatrone können Sensor und Heizelement platzsparend verbaut werden. Beide Komponenten einzeln zu verbauen, würde eine größere Hülse und somit mehr Material erfordern, was unerwünschte Trägheit ins System einbringen würde. Aus dem gleichen Grund können die aus Aluminium gefertigten Teile der Hülse nur über Klebeverbindungen gefügt werden. Da diese jedoch nicht zur Wärmeübertragung geeignet sind, werden die Klebeflächen seitlich vom Wärmestrom weg verlagert. Um an den Kontaktflächen zwischen den Einzelteilen den Wärmefluss nicht zu behindern, werden diese mit Wärmeleitpaste thermisch besser verbunden.

Auf den Einbau in ein 30 cm langes *NACA 0012* Profil aus 1 mm starken Aluminium wird verzichtet. Stattdessen wird eine ebenso dimensionierte Flügelvorderkante zusammen mit einer rückseitig liegenden Halterung für die Verbindungsstecker aus PLA 3D-gedruckt. Da dessen Wärmeleitfähigkeit mit 0,29 W/mK [43] gering ist, wird mit Ausnahme der Gussform auf eine Isolation verzichtet. Weil die aerodynamischen Eigenschaften bei dieser Ausführungsform unbedeutend sind, wird der Messteller fertigungsbedingt vor der Flügelvorderkante positioniert. Die Kabel der Heizpatrone werden über die Stecker mit den Verlängerungskabeln³ verbunden. An dieser Stelle geht die Zweileiter-Schaltung des Pt100 in eine Vierleiter-Schaltung über.

Zur Positionierung im Windkanal kann die Halterung auf zwei Gewindestangen geschoben werden. Damit die Halterung einfach montiert werden kann, besteht diese aus mehreren Teilen.

³ Die Verlängerungskabel sind in Abb. 9 nicht dargestellt.

8. Funktionsweise

8.1. Arbeitsablauf

Zur Beschreibung der Arbeitsweise des Detektorsystems müssen die Umwelt, der Detektor, die Elektronik, die Software und die Benutzerschnittstelle berücksichtigt werden (Abb. 10).

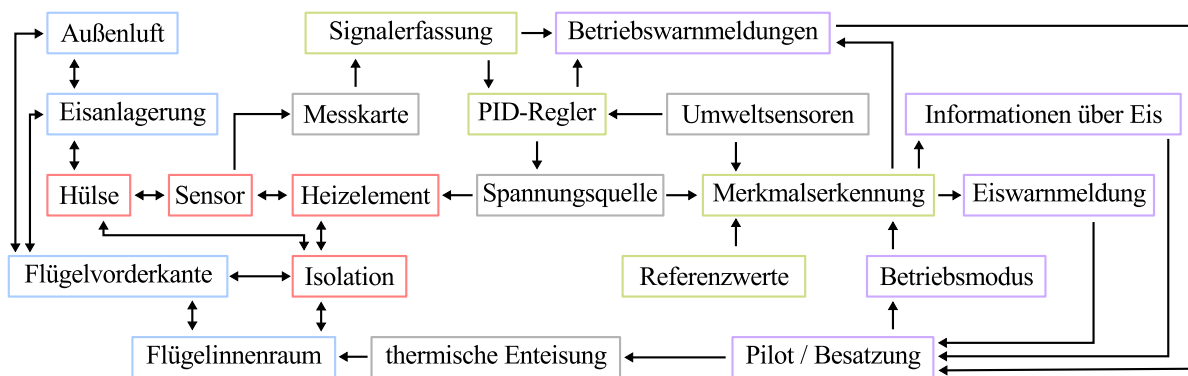


Abbildung 10: Funktionsschema des Detektorsystems, Umwelt (blau), Detektor (rot), Elektronik (grau), Software (grün) und Benutzerschnittstelle (violett)

Die Bestandteile der Leitungskomponenten stehen untereinander und mit der Umwelt in thermischer Wechselwirkung. Das Eis ändert die Wärmeübertragungseigenschaften der Messtellerfläche und nimmt durch seinen Wärmewiderstand Einfluss auf die Temperaturverteilung im Detektor. Die thermische Reihenschaltung befindet sich zwischen der Außenluft und dem Heizelement. Damit das System messfähig ist, muss das Heizelement die Sensortemperatur auf die Solltemperatur T_{Soll} aufheizen und konstant halten. Da die meiste Eisbildung bei einer Umgebungstemperatur von -10°C eintreten kann (Abb. 12), ist dieser Wert für T_{Soll} ungeeignet. Für die Versuche mit dem Prototypen wurde eine Solltemperatur von -5°C gewählt.

Trotzdem die Leitungskomponenten isoliert sind, stehen diese geringfügig über die Isolation mit der Flügelvorderkante und der Luft im Flügel in Verbindung. Diese kann so, bei einer thermischen Enteisung, einen Einfluss auf den Sensor ausüben.

Nachdem die Temperatur vom Sensor in eine elektrische Größe überführt wurde, wird diese mittels einer Vierleiterschaltung an die Messkarte übertragen und von der Signalerfassung eingelesen. Diese überträgt die Sensortemperatur an den PID-Regler, dessen Reglerparameter windgeschwindigkeitsabhängig sind und somit Daten der Umweltsensoren benötigen. Der PID-Regler gibt als Stellgröße die Heizleistung aus, welche zur Sicherheit limitiert und dann von der Spannungsquelle am Heizelement angelegt wird. Überschreitet die Stellgröße die festgelegten Grenzen wird eine Betriebswarnmeldung ausgegeben.

Von der Merkmalerkennung muss nun festgestellt werden, ob es sich um eine eisinduzierte Heizleistungsänderung handelt. Daher muss nach dem Ausschlussprinzip jeder Einfluss aufgrund einer Veränderung der Umweltparameter ausgeschlossen werden. Dafür werden Echtzeitdaten der externen Parameter (Strömungsgeschwindigkeit, Außentemperatur, Luftdruck) und internen Parameter (Ausrichtung des Flugzeuges, Flügelinnenraumtemperatur) bereit gestellt. Bei der Ausrichtung ist besonders der Anstellwinkel von Bedeutung. Die Flügelinnenraumtemperatur berücksichtigt die Sonneneinstrahlung und den Einsatz von thermischen Enteisungssystemen. Nicht alle dieser Parameter müssen zwingend berücksichtigt werden, jedoch ist die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit unumgänglich. Kann ausgeschlossen werden, dass der Heizleistungsabfall durch eine Änderung dieser Parameter hervorgerufen wurde, muss davon ausgegangen werden, dass eine Eisanlagerung vorliegt. Eine Warnmeldung wird ausgegeben und ein De-Icing gestartet.

Ist die Bestimmung der Umweltparameter nicht möglich oder geht man davon aus, dass alle Umweltparameter konstant bleiben, kann man auch ohne Korrektur den Heizleistungsabfall direkt als Indiz für eine Eisanlagerung nehmen.

Die Referenzwerte zur Eisdetektion stellen den Heizleistungsabfall in Zusammenhang mit der Änderung des jeweiligen Umweltparameters. Um die Eisdicke bestimmen zu können, benötigt man zudem Referenzwerte, die den Zusammenhang zwischen Eisdicke und Heizleistungsabfall beinhalten. Sollten Umweltparameter vorliegen, für die keine Referenzwerte hinterlegt sind, muss eine Betriebswarnung ausgegeben werden. Dies gilt auch, wenn die Sensor- die Solltemperatur überschreitet. Zur Bestimmung der Verteilung des Eises am Flugzeug benötigt man mehrere Detektoren, die einzeln angesprochen werden können.

Um die Eisart festzustellen, muss der Unterschied zwischen den thermischen Eigenschaften jeder zu bestimmenden Eisart hinterlegt sein. Da man nur über eine Messgröße (Heizleistung) aber zwei Unbekannte (Eisdicke und Eisart) verfügt, müsste eine weitere Größe gemessen werden. Dies könnte über ein optisches Messsystem, eine Gewichtsmessung oder über eine meteorologische Messung (Abb. 3) geschehen.

8.2. Positionierung und Systemintegration

Das Detektorsystem besteht aus mehreren Detektoren, die vorzugsweise an den kritischen Bereichen (Abb. 1) in die Außenhülle des Flugfahrzeuges eingelassen werden.

Da die Detektoren bündig mit der Oberfläche abschließen, können sie auch an Flügelvorderranten oder an anderen strömungsempfindlichen Bereichen positioniert werden. Aufgrund der geringen Größe eines Detektors, ist selbst die Integration in Triebwerkeinlässe, Propeller sowie Rotorblätter denkbar.

Ist die Eisdetektion an einer bestimmten Stelle der Außenhaut gewünscht, muss beachtet werden, dass dort eine geringfügige strukturelle Schwächung des Bauteils, durch die Bohrung für die Lanze, eintritt. Für jede neue Position an einem Flugzeug müssen die benötigten Referenzwerte neu bestimmt werden. Zudem muss hinter der zu überwachenden Stelle genügend Bauraum und eine Zuführungsmöglichkeit für die Kabel zur Verfügung stehen.

Pro Detektor fallen vier Kabel für den Sensor und zwei für das Heizelement an. Da jeder Detektor unabhängig geregelt und ausgelesen werden muss, können die Kabel weder in einer Reihen- noch Parallelschaltung zusammengefasst werden. Um das Gewicht und den Durchmesser der Kabelbäume gering zu halten, bietet sich eine dezentrale Spannungsregelung und Messdatenerfassung an. Benachbarte Detektoren werden gruppiert (Abb. 11). Die erfassten Messwerte werden vom Bordcomputer ausgewertet und aufbereitet ans Cockpit weitergeleitet.

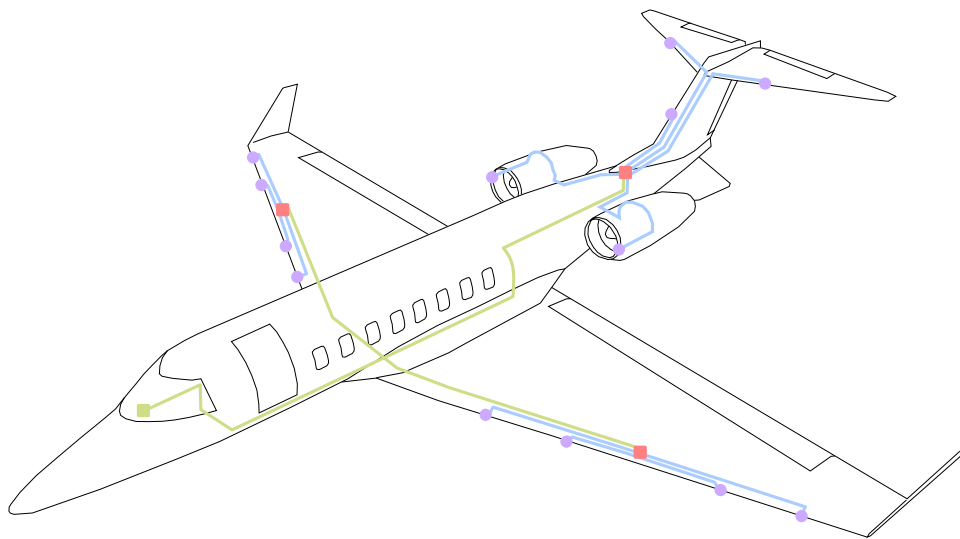


Abbildung 11: Integrationsbeispiel: Detektorpositionen (violett), Steuereinheiten (rot), Versorgungsleitungen (blau) und Datenleitungen (grün)

Unabhängig von der Positionierung des Detektors am Flugzeug, darf die Implementierung des Detektorsystems die Funktionalität des Flugzeuges nicht verringern. Die Elektronik sowie die Software müssen robust gestaltet sein und dürfen keine anderen Systeme des Flugzeuges beeinflussen.

8.3. Umweltbedingungen

Der Detektor befindet sich an der Außenhaut eines Flugzeuges und wird durch die Reibung der umströmenden Luft verschleift. Zudem kann die Außentemperatur T_0 während des Fluges auf bis zu -60°C abfallen [40] oder sich die Flugzeughülle am Boden durch die Sonneneinstrahlung auf über 50°C erhitzen [37]. Diese Belastung muss die Konstruktion und das Material ohne Leistungseinbußen auf Dauer ertragen können.

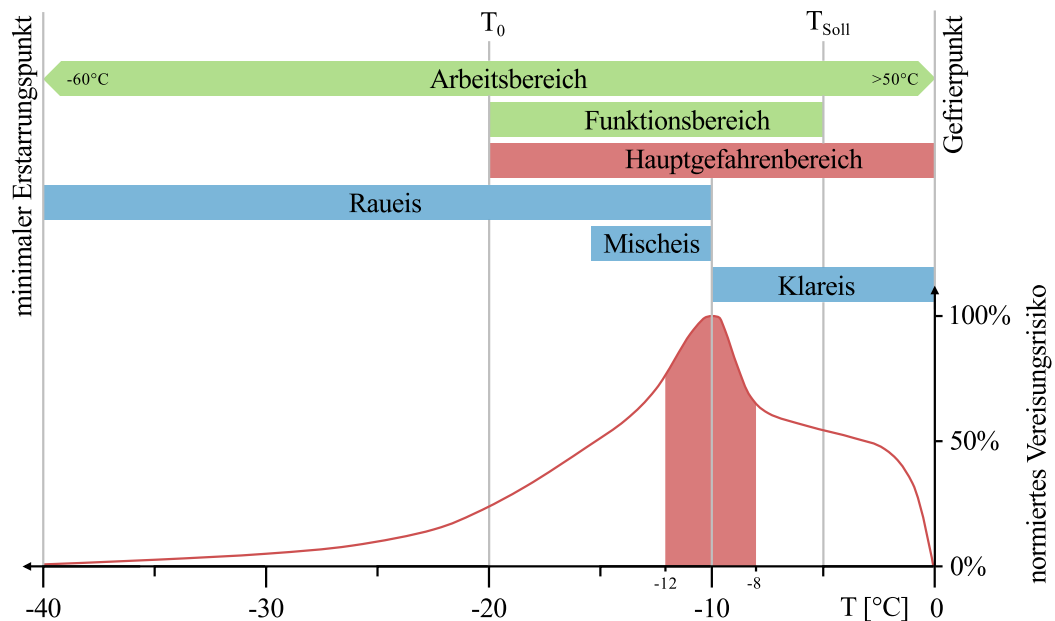


Abbildung 12: Temperaturbereiche des Detektorsystems, verändert nach [29, 46, 49, 51]

Der Arbeitsbereich des Flugzeuges und somit auch der des Detektorsystems erstreckt sich von etwa -60°C bis über 50°C (Abb. 12).

Funktionsfähig ist der Detektor jedoch nur, wenn die Sensortemperatur T_{Sen} unter der Solltemperatur T_{Soll} liegt. Bauartbedingt kommt es nicht vor, dass die Sensortemperatur unter die Umgebungstemperatur T_0 fällt. Der Funktionsbereich deckt den Hauptgefahrenbereich nur unterhalb von T_{Soll} ab. Der Temperaturbereich, der für die Flugzeugvereisung am risikobehaftetsten (vgl. Abb. 12) ist, wird durch den Funktionsbereich des Detektors komplett abgedeckt.

Realisierung

9. Machbarkeitsprüfung

9.1. Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten

Um die Funktionsfähigkeit des Konzepts zu überprüfen, wurden numerische Simulationen der Simulationsausführung durchgeführt und der dafür benötigte Wärmeübergangskoeffizient α auf unterschiedlichem Wege bestimmt.

9.1.1. Abschätzung aus Messungen der NACA

Die NACA⁴ hat 1943 die Wärmestromdichte an einem NACA 23012 Profil in Abhängigkeit der Entfernung s_{stag} vom Staupunkt (*point of stagnation*) und der Strömungsgeschwindigkeit gemessen.

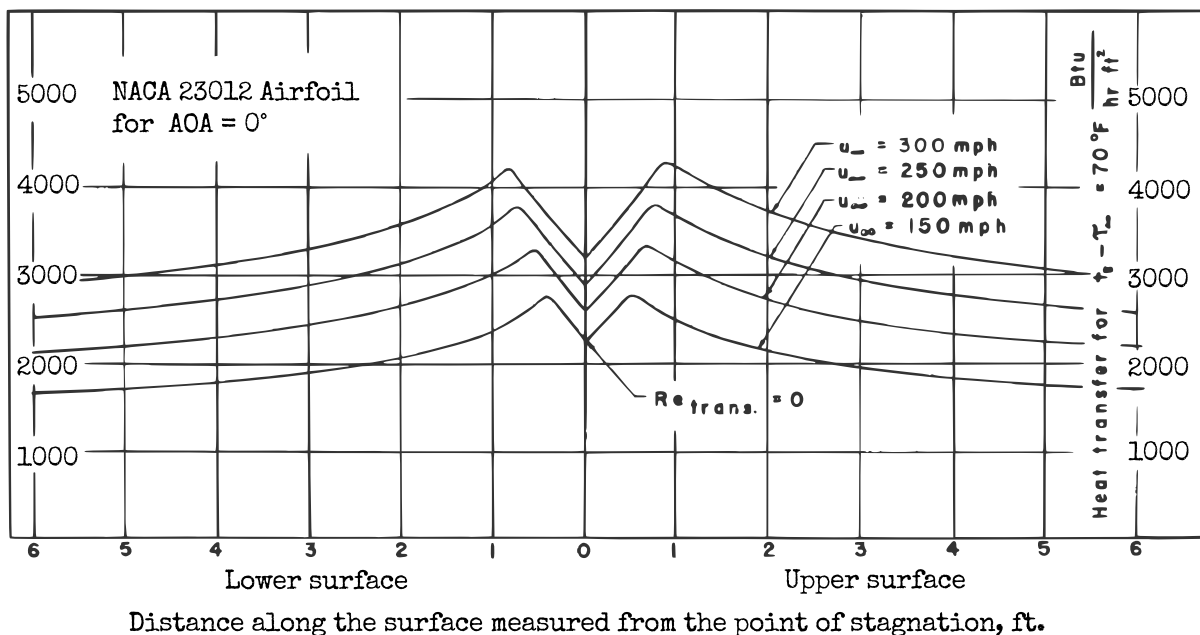


Abbildung 13: Messergebnisse der NACA, [52] verändert

Der typische Verlauf (Abb. 13) von α beginnt beim lokalen Minimum am Staupunkt, ein linearer beidseitiger Anstieg bis zu einem globalen Maximum und ein immer langsamer abfallender Trend in Richtung der Profilhinterkante folgen. Auf der Basis dieser Daten wird eine Regression für die benötigten Parameter von 40 m/s Strömungsgeschwindigkeit und 1 cm Abstand berechnet.

⁴ Die NACA wurde 1958 in die NASA umgewandelt.

1. Werte auslesen

Als Ausgangspunkte für die Regression werden die lokalen Maxima der vier Kurven auf der Flügeloberseite genommen:

Geschwindigkeit	y-Koordinate	x-Koordinate
300 mph	4281,08 Btu/hr·ft ²	0,8830 ft
250 mph	3789,19 Btu/hr·ft ²	0,7872 ft
200 mph	3329,73 Btu/hr·ft ²	0,6755 ft
150 mph	2767,57 Btu/hr·ft ²	0,5212 ft

Die Werte werden in metrische Einheiten konvertiert:

Geschwindigkeit	y-Koordinate	x-Koordinate
134,11 m/s	13501,78 W/m ²	26,914 cm
111,76 m/s	11950,45 W/m ²	23,994 cm
89,41 m/s	10501,39 W/m ²	20,589 cm
67,06 m/s	8728,43 W/m ²	15,886 cm

2. Extrapolation der Wärmestromdichte

Die Regression der Wärmestromdichte gegenüber der Geschwindigkeit lautet:

$$q(v) = 632,26711 v^{0,62441631} \quad \text{mit} \quad R^2 = 99,94\% \quad (5)$$

Diese Gleichung beschreibt die Lage der maximalen Wärmestromdichte gegenüber der Geschwindigkeit. Bei 40 m/s erhält man so eine Wärmestromdichte von 6327,80 W/m².

3. Abstand des Maximums extrapolieren Die Regression der Wärmestromdichte gegenüber des Abstandes lautet:

$$q(s_{stag}) = 4666,19542 e^{0,03937042 s_{stag}} \quad \text{mit} \quad R^2 = 99,97\% \quad (6)$$

Bei einer Wärmestromdichte von 6327,80 W/m² erhält man einen Abstandswert s_{stag} von 7,737 cm.

4. linearen Verlauf berücksichtigen

Der linksseitige Abfall des Graphen ausgehend eines Maximums folgt der Gleichung:

$$q(s_{stag}) = 0,9582271468 s_{stag} + 6320,386207 \quad (7)$$

Für den gesuchten Abstandswert von 1 cm erhält man eine Wärmestromdichte q von 6321,34 W/m².

5. Umrechnung auf Wärmeübergangskoeffizienten

Der extrapolierte Wert für q von 6321,34 W/m² wird über den formalen Zusammenhang

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T} \quad (8)$$

umgerechnet. Die Temperaturdifferenz ΔT betrug bei den Messungen 70 K (Abb. 13). Somit erhält man für dieses Profil bei 40 m/s und 1 cm Abstand vom Staupunkt einen Wärmeübergangskoeffizienten α von 90,30 W/m²K.

9.1.2. Berechnung über die Nußelt-Zahl

Um den Wärmeübergangskoeffizienten α an der Solid-Fluid-Grenzfläche eines unbedeckten Profils zu berechnen, muss man die Nußelt-Zahl Nu bestimmen. Es gilt

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (9)$$

wobei L die charakteristische Länge des Profils und λ die Wärmeleitfähigkeit des Fluides ist [1].

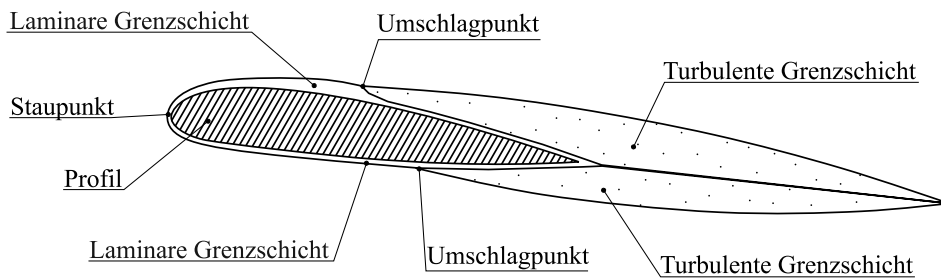


Abbildung 14: Aerodynamische Verhältnisse am umströmten Profil, [44] verändert

Die aerodynamischen Verhältnisse (Abb. 14) entlang des Profils sind so unterschiedlich, dass Nu nicht über eine Gleichung für alle Bereiche beschrieben werden kann.

Nach Wissenschaftlern der University of Florida [31] gibt es daher drei Zustände für Nu :

- Nu_{geo} Die Beschreibung über die Profilgeometrie ist gültig für Berechnungen nahe des Staupunkts.
- Nu_{lam} Vor dem Umschlagpunkt gilt diese Beschreibung für den laminaren Bereich.
- Nu_{tub} Hinter dem Umschlagpunkt bei turbulenten Strömungsverhältnissen gilt diese Beschreibung.

Die Bestimmung dieser Variablen erfordert die Berechnung der Reynolds-Zahl Re

$$Re = \frac{v_{\infty} L \rho}{\eta} \quad (10)$$

und der Prandtl-Zahl Pr

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (11)$$

mit der Freistrom-Geschwindigkeit v_{∞} , der Dichte des Fluides ρ , der dynamischen Viskosität η und der isobaren spezifischen Wärmekapazität c_p .

Der Nasenradius eines NACA 0012 beträgt 1,7% der Länge [35].

Die für die Rechnung benötigte Grenzschicht-Strömungsgeschwindigkeit v_{bl} wurde numerisch (Abb. 15) zu 36 m/s bei den gegebenen Parametern bestimmt.

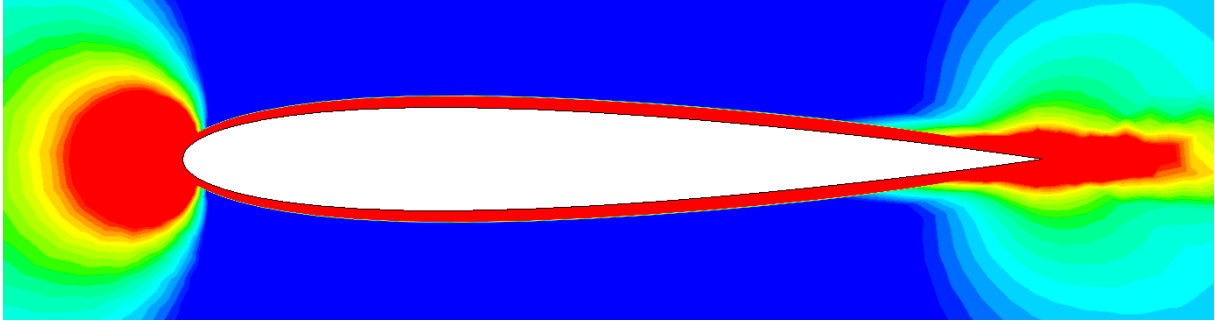


Abbildung 15: Aerodynamische Grenzschicht, CFD-Simulation; Die Farbskala löst v in Strömungsrichtung zwischen 36 m/s (rot) und 40 m/s (blau) auf

Sind diese Variablen bekannt, kann für die drei Strömungsverhältnisse am Profil [31] nach

$$Nu_{\text{geo}} = Re^{0,5} Pr^{0,4} \left[1,14 \left(\frac{L}{d} \right)^{0,5} - 2,353072 \left(\frac{L}{d} \right)^{3,5} \left(\frac{s}{L} \right)^3 \right] \quad (12)$$

$$Nu_{\text{lam}} = 0,286 Re^{0,5} \left(\frac{v_{bl}}{v_{\infty}} \right)^{0,5} \left(\frac{L}{s} \right)^{0,5} \quad (13)$$

$$Nu_{\text{tub}} = 0,0296 Pr^{\frac{1}{3}} Re^{0,8} \left(\frac{v_{bl}}{v_{\infty}} \right)^{0,8} \left(\frac{L}{s} \right)^{0,2} \quad (14)$$

mit v_{bl} der lokalen Strömungsgeschwindigkeit an der äußeren Kante der Grenzschicht (*boundary layer*), der Entfernung s entlang der Profilloberfläche ausgehen von der Flügelvorderkante und d dem doppelten Nasenradius des Profils und den Werten

$\lambda = 0,026 \text{ W/mK}$	$L = 0,3 \text{ m}$	$v_{\infty} = 40 \text{ m/s}$
$\rho = 1,39402 \text{ kg/m}^3$	$\eta = 1,60701 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$	$d = 0,0051 \text{ m}$
$v_{bl} = 36 \text{ m/s}$	$c_p = 1005 \text{ J/kg K}$	

nach der Gleichung 9 jeweils α als Funktion von s aufgetragen werden (Abb. 16).

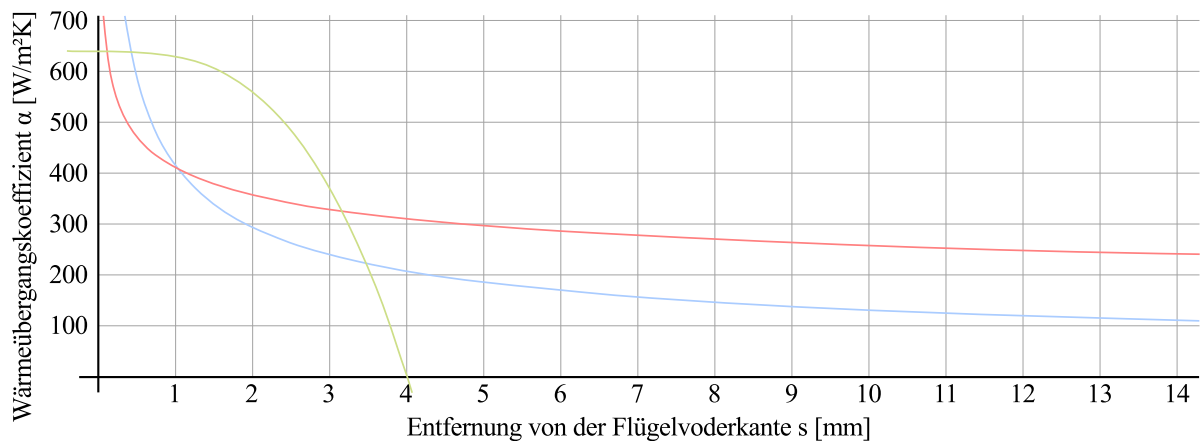


Abbildung 16: Verteilung des Wärmeübergangskoeffizienten über die Flügelvorderkante eines 30cm langen NACA 0012 Profils; grün: α_{geo} , blau: α_{lam} , rot: α_{tub}

9.1.3. Messungen im Enteisungsprüfstand

Um den Wärmeübergangskoeffizienten α für verschiedene Umweltparameter zu bestimmen, wird der Prototyp im Windkanal montiert und durch die Tiefkühlkammer heruntergekühlt. Die Sensortemperatur T_{Sen} und die Lufttemperatur T_{EPS} wird mit 5 Hz aufgezeichnet.

Da T_{Sen} eine Verzögerung und einen Anfangsversatz T_{offset} im Vergleich zu T_{EPS} aufweist, wird vor einer Messung gewartet, bis dieser keine Veränderung mehr aufweist und

$$\Delta T = T_{Sen} - T_{EPS} - T_{offset} \quad (15)$$

gilt. Der Anfangsversatz $T_{offset} = T_{Sen}(0) - T_{EPS}(0)$ vor Beginn der Messung wird korrigiert (Abb. 17). Ob er positiv oder negativ ist, hat nicht zwangsläufig damit zu tun, ob während des Abkühlen oder Auftauen gemessen wurde. Die vom Windkanal erzeugte

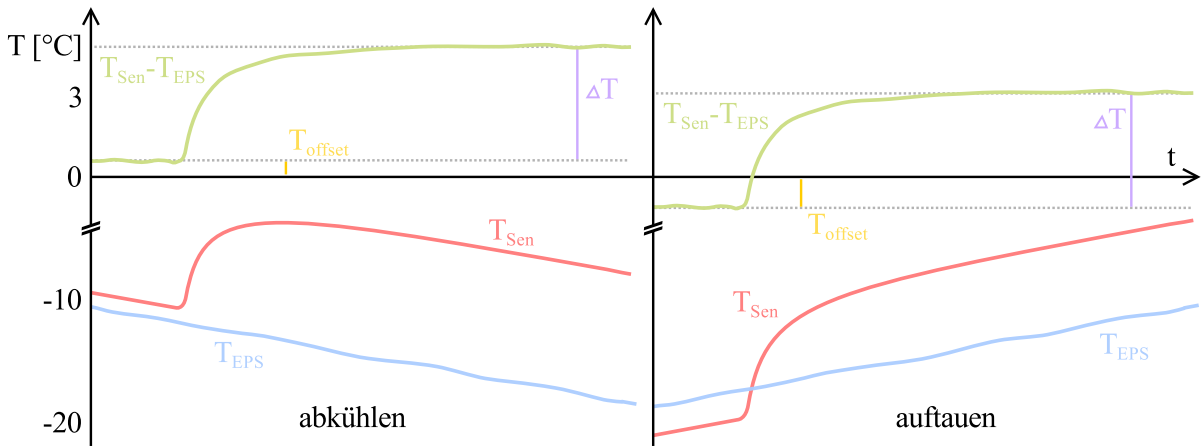


Abbildung 17: Schema der Berechnung des Temperaturanstiegs ΔT

Wärme pro Zeiteinheit im Gleichgewicht mit dem durch die Tiefkühlkammer entzogenen Wärmestrom zu halten, ist äußerst schwierig. Daher findet man in den Zeitreihen einen leichten positiven oder negativen Trend, welcher durch das Bilden von ΔT beseitigt wird, aber dabei die Schwankungen von T_{EPS} auf das Ergebnis überträgt.

Um α zu bestimmen, wird eine konstante Leistung P_{el} von 1,044 W ($U=30$ V bei $I=34,8$ mA) an das Heizelement angelegt. Die Sensortemperatur sollte den Gefrierpunkt während der Messung nicht überschreiten.

Der Widerstand des gesamten Kabelweges beträgt mit $0,3 \Omega$ nicht einmal 1% des Heizelementwiderstandes mit 862Ω und so kann der Wirkungsgrad φ vernachlässigt werden. Es gilt

$$P_{el} \varphi = U I \varphi = \dot{Q} = \alpha A \Delta T \quad \text{mit} \quad \varphi = 1 \quad (16)$$

und mit Gleichung 15 ergibt sich

$$\alpha = \frac{U I \varphi}{A (T_{Sen} - T_{EPS} - T_{offset})} \quad \text{mit} \quad \varphi = 1 \quad (17)$$

für den Wärmeübergangskoeffizienten α .

Die Kontaktfläche A des Messtellers am Prototypen beträgt $553,217 \text{ mm}^2$. Trägt man die so ermittelten Werte für α gegen die Temperatur T_{EPS} zu Beginn einer Messung auf, erkennt man, dass diese keinen Einfluss ausübt (Abb. 47). Dies ist auch aus der Gleichung 17 ersichtlich. Gegenüber der Windgeschwindigkeit ergibt sich eine Abhängigkeit (Abb. 18).

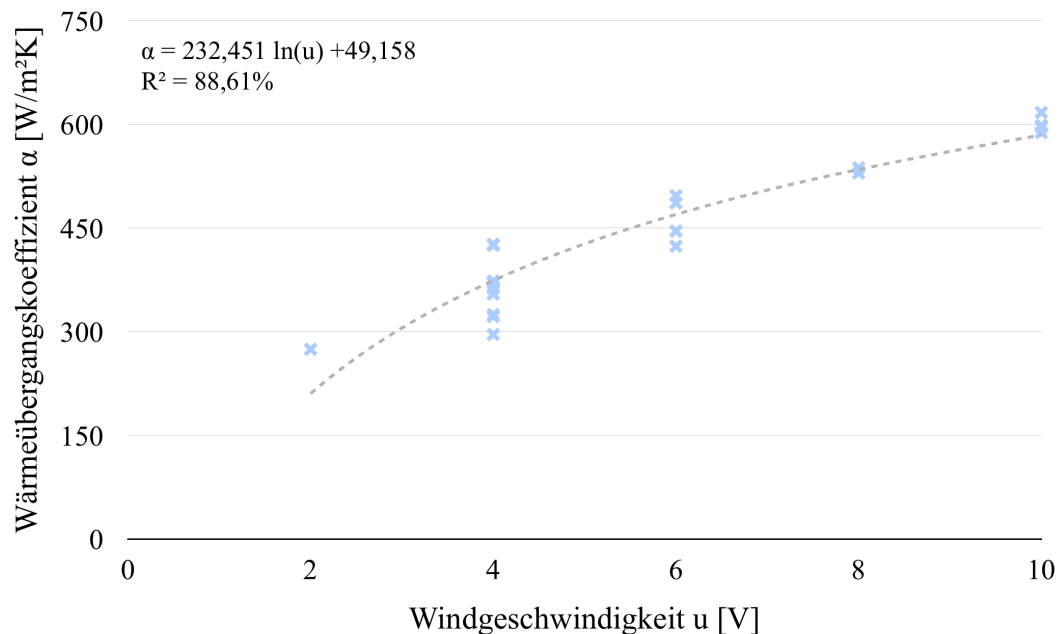


Abbildung 18: Windgeschwindigkeitsabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten

9.2. Simulationen zur Machbarkeitsprüfung

9.2.1. Variation der Eisdicke

Es wird eine thermisch-stationäre Simulationsreihe mit verschiedenen Eisdicken an der Simulationsausführung durchgeführt (Abb. 19).

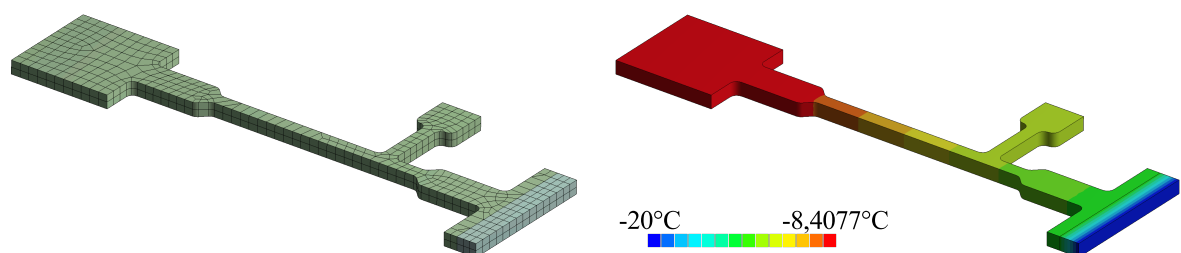


Abbildung 19: FEM-Modell mit 2 mm Eisanlagerung, thermisch-stationäre Analyse, an der Simulationsausführung, Netz (links), Temperaturgradient (rechts)

Bei der Materialzuweisung wird der Lanze Kupfer ($\lambda_{Cu} = 400 \text{ W/mK}$ [23]) zugeteilt und dem Eis wird die isotrope thermische Leitfähigkeit bei -20°C von $2,4 \text{ W/mK}$ [4] zuge-

wiesen. Die Umgebungsluft wird nicht in das Modell mit eingebracht, da die dortigen thermischen Prozesse zu komplex sind. Die Außen- und Starttemperatur beträgt -20°C . An der Kontaktfläche der Lanze wird Eis als Volumenkörper in den Dicken 0, 500, 1000, 2000 und 3000 μm angebracht. An der Rückseite der Lanze wird ein Wärmestrom von 200 mW eingeleitet und an der Außenseite des Eises betragsmäßig gleich entzogen. Zudem wird die Temperatur der Außenfläche des Eises auf die Außentemperatur festgelegt. Alle sonstigen Flächen sind perfekt isoliert, ihr Wärmestrom ist gleich Null. Die Netzgröße wurde, ohne eine lokale Netzverfeinerung, als *fein* gewählt. Die thermischen Berechnungsfehler sind hinreichend gering. Für jede Eisdicke wird die Sensortemperatur T_{Sim} aufgezeichnet.

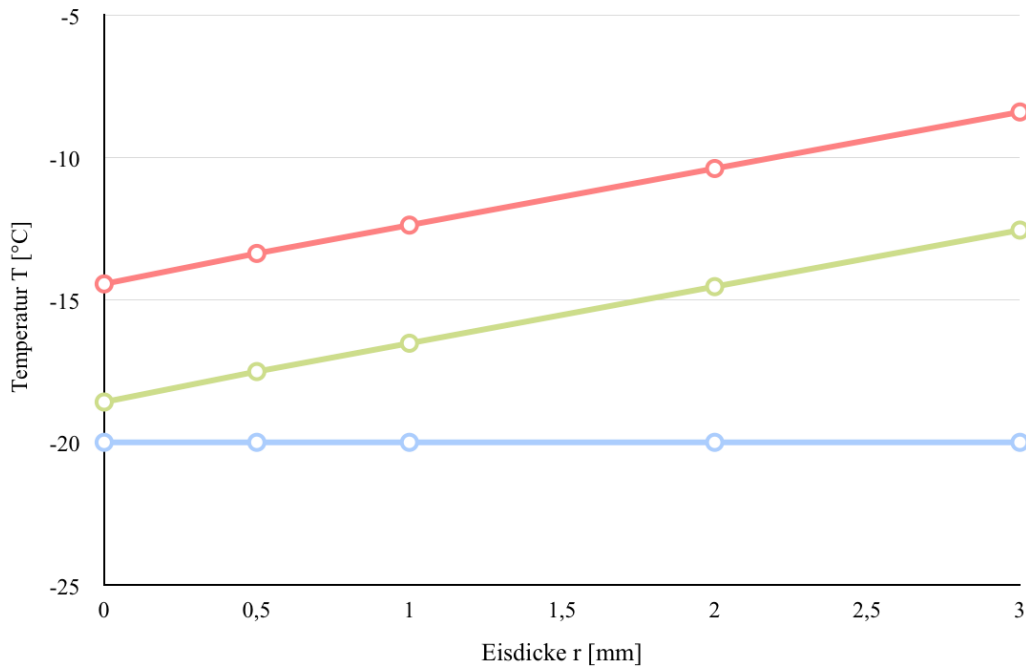


Abbildung 20: Simulationsausführung: Stationäre Sensortemperatur T_{Sim} (grün), Maximaltemperatur (rot), Minimaltemperatur (blau) in Abhängigkeit der Eisdicke r

Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang (Abb. 20) zwischen Eisdicke r und Sensortemperatur T_{Sim} (grün) sowie der höchsten Temperatur am Heizelement (rot). Die Tiefsttemperatur am Eis (blau) beträgt konstant -20°C . Für diese Randbedingungen hängt die Sensortemperatur T_{Sim} von der Eisdicke r [mm] ab:

$$T_{Sim} = 2,0028 r - 18,547 \quad (18)$$

Da die Außenflächen perfekt isoliert sind, dürfte der eisinduzierte Temperaturanstieg bei T_{Sim} deutlich höher sein als bei der realen Sensortemperatur T_{Sen} .

9.2.2. Konvektionsabfall

Es wird eine thermisch-transiente Simulation der Simulationsausführung durchgeführt, um den Einfluss eines prozentualen Abfalls des Wärmeübergangskoeffizienten α mit der

zugehörigen Temperaturdifferenz in Zusammenhang zu setzen. Außerdem wird der durch den Konvektionsabfall eingesparte Wärmestrom über die Gleichung 16 in die entsprechende Spannung überführt, die am Heizelement des Prototypen eingespart werden könnte.

Der Lanze wird als Material Kupfer ($\lambda = 400 \text{ W/mK}$ [23]) zugewiesen, das Eis ist nicht als Volumenkörper vorhanden, sondern wird über die Veränderung von α simuliert. Je dicker das Eis ist, desto geringer ist α an der Grenzfläche und umso höher ist der Konvektionsabfall. Dies wird über eine Konvektion-Randbedingung an der Kontaktfläche der Lanze festgelegt. Die Außentemperatur beträgt -20°C und α wird variiert. An der gegenüberliegenden Seite wird ein konstanter Wärmestrom von 500 mW angelegt. Alle sonstigen Flächen des Modells sind vollständig isoliert. Die Starttemperatur beträgt -20°C . Es werden 200 Sekunden simuliert. Diese Zeitdauer entspricht etwa 2600 Recheniterationen, welche programmgesteuert über den Zeitraum verteilt werden.

Da innerhalb einer Simulation der eingeleitete Wärmestrom mit 500 mW und die Konvektion je mit Werten zwischen 10^{-5} bis $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ für α , bei einer gleichbleibenden Außentemperatur von -20°C konstant anliegen, stellt sich nach einer bestimmten Zeit eine konstante Temperatur am Sensor T_{Sim} ein. Wird α kleiner dauert es bis zum Erreichen des Gleichgewichts immer länger. Daher wird immer der gleiche Zeitpunkt nach 200 Sekunden ausgewertet. Eine stationäre Analyse würde, aufgrund der guten Isolation des Rechengebietes, unrealistisch hohe Endtemperaturen erreichen.

Der Temperaturverlauf beginnt gleich und divergiert dann mit zunehmender Zeit (Abb. 21). Der unterste Graph entspricht einem α von $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$, die darüber liegenden Graphen haben je $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ weniger und der Oberste basiert auf einem α von $10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$.

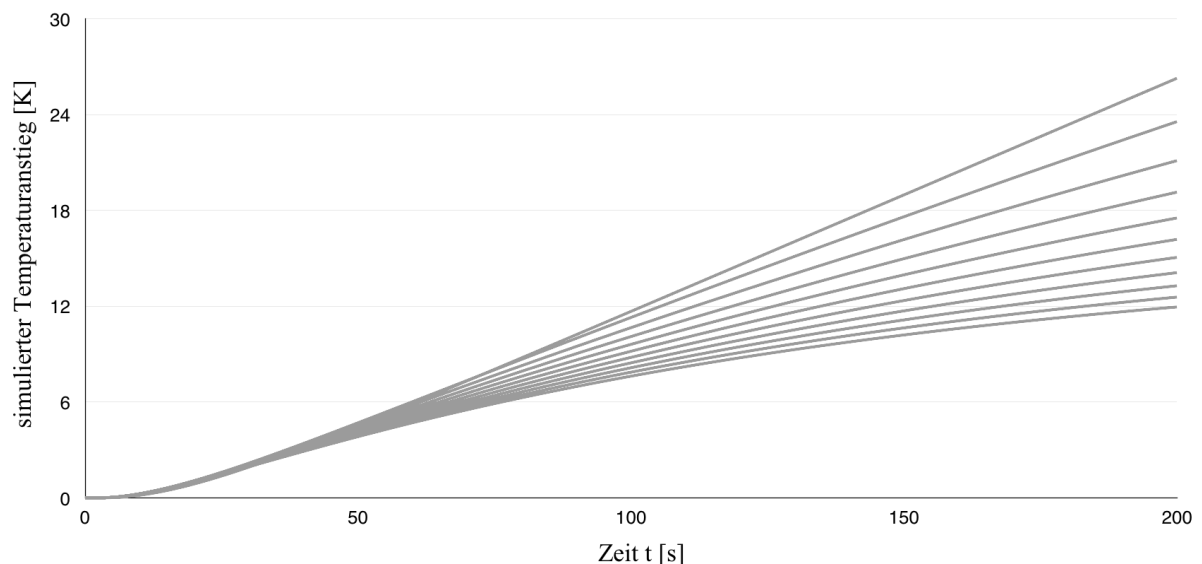


Abbildung 21: Temperaturerhöhung am simulierten Sensor für verschiedene Wärmeübergangskoeffizienten von $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ (unten) bis $10^{-5} \text{ W/m}^2\text{K}$ (oben), Simulationsausführung

Über die Gleichung 16 und dem Widerstand des Heizelements R_{el} von 862Ω kann man die Spannung berechnen, die aufgrund des Konvektionsabfalls eingespart werden könnte, wenn es sich um den Prototypen handeln würde. Es ergibt sich mit $\varphi=1$ nach

$$U = \sqrt{R_{el} P_{el}} = \sqrt{\frac{R_{el} \alpha A \Delta T}{\varphi}} \quad (19)$$

der dargestellte Spannungsverlauf (Abb. 22). Die Temperatur steigt mit zunehmendem Konvektionsabfall.

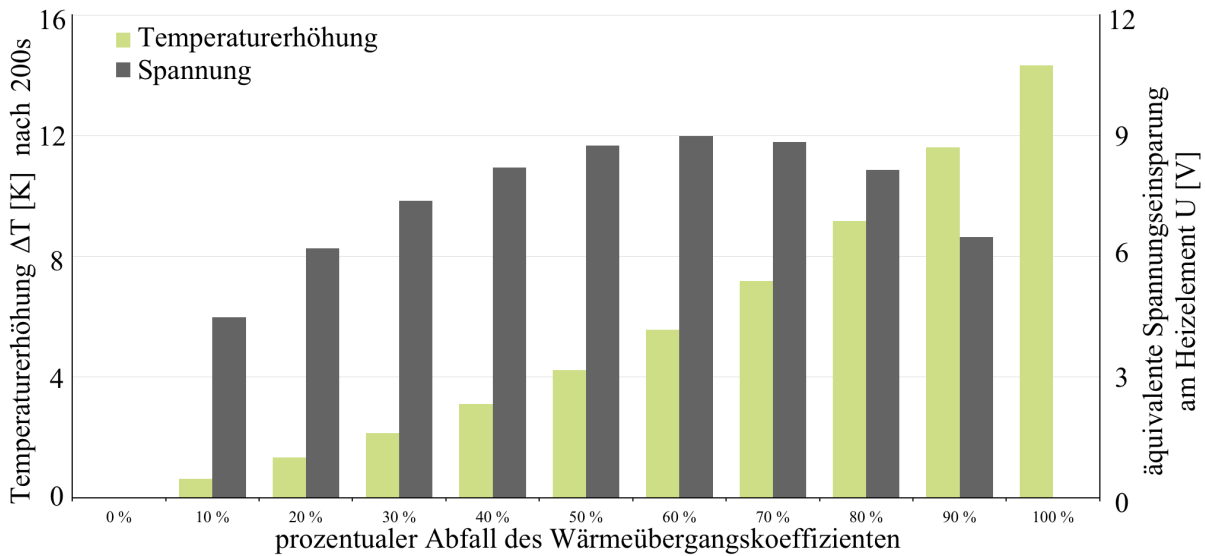


Abbildung 22: Temperaturerhöhung (grün) und entsprechender Spannungsverlauf (grau) aufgrund eines prozentualen Konvektionsabfalls an der Simulation ausführung

Die eingesparte Spannung erreicht bei 60% Konvektionsabfall ein Maximum, da die Temperaturdifferenz ΔT steigt, aber der Wärmeübergangskoeffizient α fällt (vgl. Gl. 19). Da bei der Eisdicken-Messung wahrscheinlich kein Konvektionsabfall in diesem hohen Maße (>60%) bzw. kein durch den steigen thermischen Widerstand bewirkten Temperaturanstieg von über 5 K zu erwarten ist, kann man davon ausgehen, dass diese mehrdeutige Zuordnung der Spannungswerte in der Anwendung keine Probleme hervorruft.

10. Signalverarbeitung

Es gibt mehrere Softwaresysteme, die dem Eisdetektor seine Funktionalität verleihen:

1. Sensorik
2. Elektronik
3. Regelung
4. Messdatenerfassung
5. Merkmalerkennung

Die Sensorik wandelt die Temperatur in einen elektrisch messbaren Widerstand um. Die Elektronik leitet die Informationen weiter zum Computer und versorgt andererseits die Heizpatrone mit Strom. Die Regelung der Heizleistung ist die Voraussetzung dafür, dass Messwerte aufgenommen werden können. Dies ist nur möglich, wenn die Sensortemperatur innerhalb der Toleranz um die Solltemperatur liegt. Die Messdatenerfassung wandelt die Eingangssignale in Daten um, die von der Merkmalerkennung ausgewertet werden. Letztere wurde beim Prototypen nicht realisiert.

10.1. Temperatursensor

Als Temperatursensor wird ein Pt100-Messwiderstand verwendet. Dieser besitzt bei 0°C einen festgelegten Nennwiderstand R_0 von 100 Ω und eine genormte Kennlinie gegenüber Temperaturveränderungen. Diese Sensoren sind weit verbreitet, da sie als reaktionsschnell und genau gelten.

Die Kennlinie eines Pt100 wird für den Temperaturbereich von -200 °C bis 0 °C von der DIN IEC 751 [32] als Polynom vierten Grades festgelegt:

$$R(T) = R_0 \left(1 + AT + BT^2 + \underbrace{C(T - 100)T^3}_{= 0, \text{ für } C = 0} \right) \quad (20)$$

Für die Koeffizienten gilt:

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ °C}^{-1} \quad (21)$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-2} \quad (22)$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ °C}^{-3} \quad (23)$$

Da dieses Polynom nicht analytisch nach T aufzulösen ist, wird $C = 0$ gesetzt und es folgt:

$$T(R) = \frac{\sqrt{(A^2 - 4B)R_0^2 + 4RBR_0} - AR_0}{2BR_0} \quad (24)$$

Der andere Temperaturbereich bis 850°C liegt außerhalb des Funktionsbereiches und wird laut DIN IEC 751 über $R(T) = R_0(1 + AT + BT^2)$ beschrieben.

10.2. Heizleistungsregelung

Um die Sensortemperatur T_{Sen} innerhalb ihrer Toleranz um die Solltemperatur T_{Soll} zu halten, muss die Heizleistung der Patrone geregelt werden. Dafür wird ein PID-Regler verwendet. Dieser muss über die Heizpatrone genauso viel Energie zuführen, wie über Wärmeleitung und vor allem über Konvektion an der Heizpatrone abgeleitet wird. Unter Vernachlässigung der Wärmeleitung ist aufgrund von α dieser Wärmestrom $\dot{Q} = \alpha A (T_{Sen} - T_{EPS}) = P_{el} \varphi$ (vgl. Gl. 15 und 16) windgeschwindigkeitsabhängig (Abb. 18). Da durch die Regelung die Sensortemperatur T_{Sen} konstant gehalten wird, ist \dot{Q} auch von der Lufttemperatur T_{EPS} abhängig.

Ein PID-Regler besitzt proportionale, differentiale und integrale Bestandteile. Der P-Anteil verstärkt oder schwächt die Stellgröße proportional zum Fehler. Praktisch erreicht er jedoch nie den Endwert und es ergibt sich eine bleibende Regelabweichung. Daher wird das System um einen I-Anteil ergänzt. Dieser integriert die Abweichung über die letzten Messwerte, reagiert also eher träge, kann dafür aber eine Endabweichung kompensieren. Um diese Trägheit auszugleichen, wird ergänzend noch ein D-Anteil hinzugefügt. Dieser bildet die erste zeitliche Ableitung der momentanen Abweichung und kann so frühzeitig auf Änderung reagieren. [33]

10.2.1. Regelkreis

Der PID-Regler muss über den gesamten Funktionsbereich des Detektors ausgelegt sein. Um dies zu gewährleisten, müssen die Reglerparameter während des Betriebs in Echtzeit angepasst werden. Um Hardwareschäden zu vermeiden, ist die Funktion des Reglers durch Kontrollprogramme, sog. Watchdog Counter (WDC), zu überwachen.

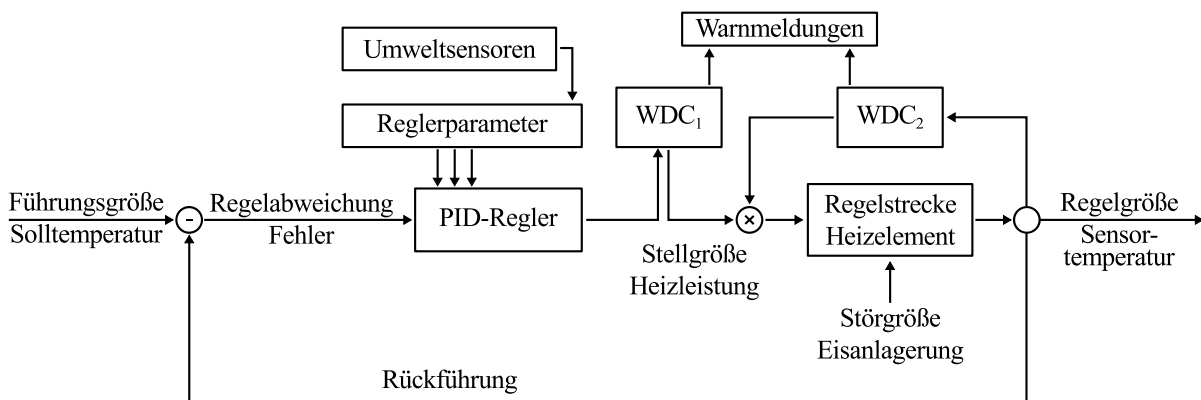


Abbildung 23: Regelkreis der Heizleistungsregelung

Der Regelkreis besteht hauptsächlich aus dem PID-Regler und dessen WDCs (Abb. 23). Die Regelstrecke entspricht dem Heizelement und die darauf einwirkende Störgröße ist der eisinduzierte Temperaturanstieg sowie andere Umwelteinflüsse. Die Regelgröße, die Sensortemperatur, wird zurückgeführt und mit der Führungsgröße, der Solltemperatur, zur

Regelabweichung verrechnet. Diese wird zusammen mit den momentan gültigen Reglerparametern dem PID-Regler zugeführt, welcher die Stellgröße berechnet. Die Reglerparameter werden auf Grundlage der Umweltsensoren bestimmt. Die vom PID-Regler ermittelte Stellgröße wird von einem WDC überprüft und gegebenenfalls limitiert.

Die Stellgröße des Reglers wird über die maximale Leistung des verbauten Heizelementes limitiert. Bei dem Prototypen ist die maximale Leistung der Spannungsquelle geringer als die des Heizelementes. Daher wird die Stellgröße auf die maximalen 52,3 V der Spannungsquelle begrenzt, was einer Heizleistung von 3,17 W entspricht. Da die Heizpatrone nicht kühlen kann, ist der kleinste Wert den die Stellgröße annehmen kann 0 W. Die begrenzte Stellgröße wird an das Heizelement übergeben.

Da der Detektor nicht überhitzen darf, sollte die Sensortemperatur einen festgelegten Grenzwert nicht überschreiten. Zur Festlegung dieses Grenzwertes ergeben sich zwei Möglichkeiten. Für die Anwendung bietet es sich an, den Gefrierpunkt als Grenzwert zu wählen, so gibt der Detektor eine Betriebswarnung aus, wenn er in einen Temperaturbereich kommt, in dem er selbst das Eis abtauen könnte. Der Messteller würde dann keine Vereisung aufweisen und das Detektorsystem keine Eiswarnmeldung herausgeben, obwohl sich möglicherweise an anderen Flugzeugkomponenten Eis befinden könnte.

Für die Versuche im Enteisungsprüfstand wurde die andere Möglichkeit gewählt. Der Grenzwert wurde auf 40°C festgelegt, da bei höheren Temperaturen die Gefahr droht, dass der Detektor Schaden durch das Schmelzen der PLA-Komponenten nimmt.

Beim Überschreiten des Grenzwertes sorgt ein WDC für die Abschaltung der Heizpatrone, in dem die Stellgröße auf Null gesetzt wird. Das Einwirken der WDCs auf den Regelkreis kann mit dem Ausgeben von Warnmeldungen versehen werden, da bei Betriebsstörungen die Besatzung zu informieren ist.

10.2.2. Reglereinstellung

Bei der Einstellung des PID-Reglers ist zu beachten, dass die Heizpatrone nur heizen aber nicht kühlen kann. Deshalb sind positive Abweichungen von der Solltemperatur, wie beim Überschwingen zu vermeiden.

Die Heizrate wird über die Heizleistung festgelegt. Die Abkühlrate hingegen ist von den Umgebungsparametern abhängig und kann somit nicht beeinflusst werden. Die Reglerparameter sollten auf den aperiodischen Fall, das heißt auf verbotenes Überschwingen sowie für gutes Störverhalten ausgelegt werden. Die über die Auslegungsmethode von Chien-Hrones-Reswick in Vorversuchen ermittelten Parameter, haben sich als nicht brauchbar erwiesen. Die für die Auslegung aufgenommenen Sprungantworten, also die Reaktion des Systems auf eine Stufe, konnten jedoch nachweisen, dass die Reglerparameter windgeschwindigkeitsabhängig sind. Eine Temperaturabhängigkeit liegt nicht vor.

Die Versuche im Enteisungsprüfstand wurden bei einer konstanten Spannung am Windkanal von 8 V durchgeführt, was etwa einer Windgeschwindigkeit von 33 m/s entspricht. Für diesen Fall wurden die Reglerparameter empirisch bestimmt ($P=15$, $I=3,1$, $D=100$). Mit diesen Reglerparameter weist der Regler eine sich veränderliche Schwingung um den

Sollwert auf. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungstemperatur und der Solltemperatur ist, desto größer ist die Amplitude der Schwingung.

Eine optimale Regelung sollte nach einer Störung eine möglichst kurze Ausregelzeit aufweisen und in allen Situationen ein Überspringen verhindern bzw. eine möglichst geringe Überspringweite aufweisen. Die Toleranzbreite muss geringer, als die eisinduzierte Temperaturänderung bei deaktivierter Regelung, sein, da sonst eine Eisanlagerung keine Regelung nach sich ziehen und sich folglich kein Messsignal ergeben würde.

10.2.3. Regler-VI

Das Regler-Virtual Instrument (VI) (Abb. 63) wird als Unterprogramm, als SubVI⁵, in das Steuerprogramm des Enteisungsprüfstandes integriert. Innerhalb dieses Programms läuft es in einer While-Schleife ab. Übergabeparameter sind die Soll- und Sensortemperatur sowie die Windgeschwindigkeit in V als Input und als Output gibt das Regler-VI die Spannung des Netzteils aus.

Zuerst werden auf Grundlage der Windgeschwindigkeit die Reglerparameter für den PID-Regler über eine Geradengleichung bestimmt. Die Berechnungen des Reglers findet in einer gestapelten Sequenz statt. Im ersten Schritt wird aus Soll- und Sensortemperatur die Regelabweichung, der aktuelle Fehler, berechnet. Dieser wird zwischengespeichert.

Im nächsten Schritt wird der P- und D-Anteil berechnet. Für den P-Anteil wird der Fehler mit dem P-Parameter multipliziert. Für den D-Anteil wird der drittletzte Fehler von dem aktuellen Fehler subtrahiert und mit dem D-Parameter multipliziert. P- und D-Anteil werden zwischengespeichert.

Zur Bestimmung des I-Anteils werden die letzten 25 Fehlerwerte aufsummiert, mit dem I-Parameter multipliziert und ebenfalls zwischengespeichert.

Im letzten Schritt werden die drei Anteile zur Stellgröße summiert und der aktuelle Fehler an drei Rückkopplungsknoten weitergegeben, die so je den drittletzten Fehler für den nächsten Schleifendurchlauf bereitstellen. Die Initialisierung der Rückkopplungsknoten erfolgt jeweils mit einer Null.

Nun folgt die Limitierung der Stellgröße durch die WDCs. Diese sind als Vergleich mit nachfolgender Case-Struktur ausgeführt. Es findet ein Vergleich mit dem maximalen und minimalen zulässigen Wert statt, sowie eine Abfrage, ob ein Überhitzen vorliegt. Ist dies der Fall wird die Stellgröße genullt. Nachfolgend findet das Umrechnen der Stellgröße für den Wertebereich des Netzteils statt.

⁵ Das Logo des Sub-VI zeigt eine Sprungantwort, PID steht für PID-Regler und HP steht für Heizpatrone.

Erprobung

11. Simulation

11.1. Bestimmung der Randbedingungen

Für die Durchführung der Simulation sind zwei Voraussetzungen nötig. Die Geometrie des Detektors und die am Rechengbiet anzulegenden Randbedingungen müssen bekannt sein. In Kapitel 9.1 wurde der Wärmeübergangskoeffizient α bereits bestimmt. Die Geometrie des Detektors ist, mit Ausnahme des inneren Aufbaus der Heizpatrone, bekannt. Um diesen in Erfahrung zu bringen, werden folgende Untersuchungen durchgeführt.

11.1.1. Mikroskopische Vermessung

Die Heizpatrone wird mit einer Umlauf-Bandsäge in der Länge halbiert und mittels digitalem Lichtmikroskop optisch vermessen (Abb. 24).

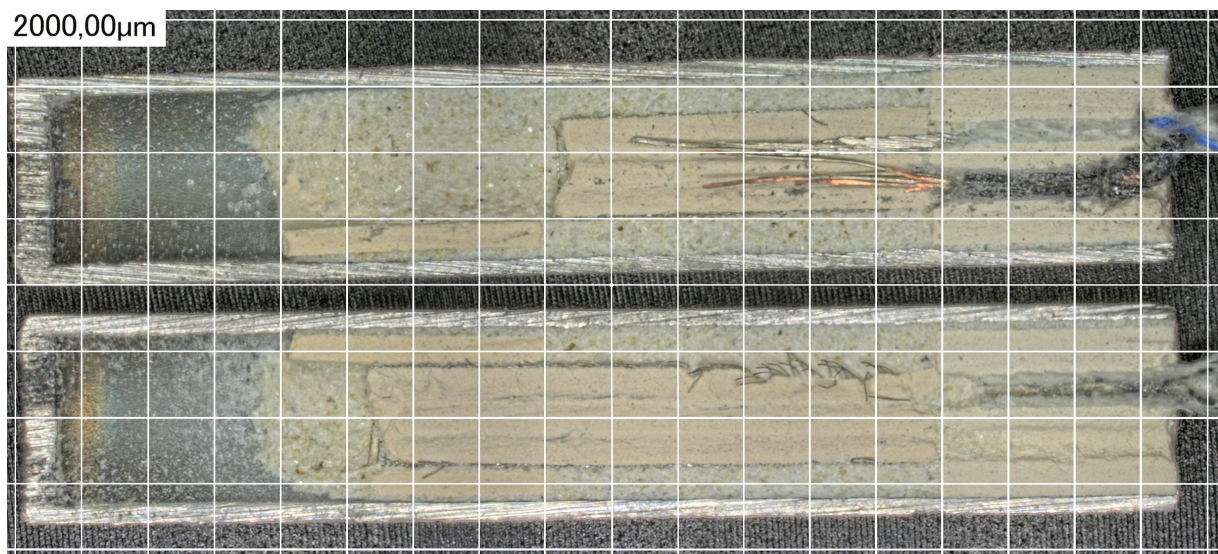


Abbildung 24: HDR-Aufnahme (20×) beider Schnittflächen der Heizpatrone, aus Einzelbildern zusammengesetzt, Gitterabstand 2000µm

An den Schnittflächen kann man zwischen den beigefarbenen homogenen Wickelkörpern und der andersfarbigen pulverigen MgO-Isolation unterscheiden. Man erkennt an der Mantelfläche des mittigen zylindrischen Wickelkörpers einige Drähte des Heizelementes und die Kabel im Inneren, die aus der Patrone austreten. Die Drähte bilden das Heizelement und die Kabel sorgen für die Stromversorgung. Während des Sägevorgangs entstand am Patronenboden ein Hohlraum (Abb. 24 links). Dort befand sich der Pt100-Tempersensor,

dessen Abmessungen weiterhin unbekannt sind. Die Geometrie des Heizelementes konnte vermessen werden.

11.1.2. CT-Scan

Die Heizpatrone wurde am Institut für Füge- und Schweißtechnik durchleuchtet und die Daten am Institut für Werkstoffe aufbereitet (Abb. 25). Ziel der Untersuchung ist es genügend Informationen zu erhalten, damit die Geometrie des Temperatursensors für die Simulation festgelegt werden kann.

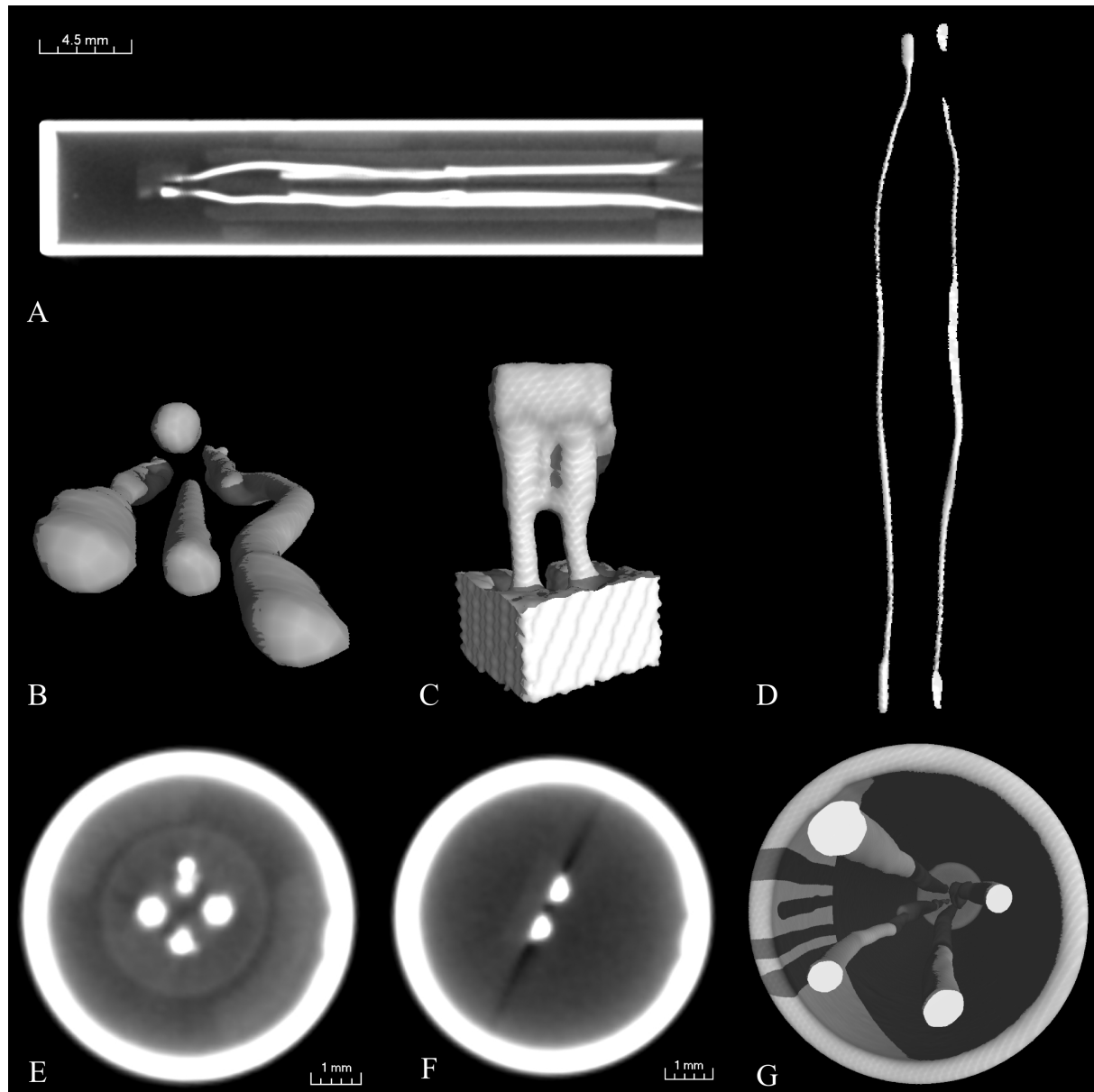


Abbildung 25: Verschiedene 2D- und 3D-Ansichten der Heizpatrone im CT-Scan

Bei den 2D Aufnahmen (Abb. 25A, E, F) gilt, je weißer desto dichter ist das dort abgebildete Material. Platin ist das Material mit der höchsten Dichte innerhalb der Heizpatrone

und müsste folglich, am hellsten dargestellt werden. Es folgen metallische Materialien und dann Keramiken, wie in diesem Fall das MgO. Es ist sogar möglich zwischen den Wickelkörpern und der pulverigen Füllung zu unterscheiden (Abb. 25A, E). Bereiche mit sehr geringer Dichte, wie die Umgebungsluft, werden schwarz dargestellt.

Die 3D-Aufnahmen (Abb. 25B, C, D, G) werden durch das Eingrenzen des dargestellten Bereiches über das Dichte-Histogramm des Materials erzeugt. Die Atomkerne absorbieren die Röntgenstrahlung, somit ist die Intensität nach dem Durchstrahlen antiproportional zur Dichte des Materials.

Abb. 25A Mittiger Schnitt durch die Heizpatrone, vgl. Abb. 24. Man erkennt die beiden Kabel, die zum Pt100 führen und die etwas Kürzeren, die das Heizelement mit Strom versorgen. Zudem kann man den Patronenmantel und die MgO-Bestandteile voneinander unterscheiden.

Abb. 25B Frontsicht auf die Kabel. Man erkennt vorne im Bild die Verdickung der beiden Kabel des Pt100.

Abb. 25C Es befindet sich zwischen den beiden Kabeln eine Verbindung mit einer geringeren Dichte als die von Metall. Hierbei handelt es sich um die Stützstruktur des Pt100, jedoch nicht um das Platin selbst.

Abb. 25D Hier sind ausschließlich die Bereiche mit der höchsten Dichte des Scans sichtbar gemacht. Es handelt sich dabei um die Kabel, die zum Pt100 hinführen.

Abb. 25E An der Position der Heizleistungsverstärkung befinden sich gegenüberliegend zwei MgO-Körper.

Abb. 25F Im Bereich des Pt100 tritt im Querschnitt ein Strahlartefakt⁶ auf. In den Richtungen in denen das Strahlartefakt auftritt, wurden zuvor übermäßig viele Photonen absorbiert, sodass fälschlicherweise die nachfolgenden Volumenabschnitte als Bereiche geringerer Dichte erscheinen. Das Strahlartefakt zeigt in mehr als eine Richtung, da die Heizpatrone während des Scans um 360° gedreht wurde. Dass es in zwei gegenüberliegende Richtungen weist, bedeutet, dass in dieser Ebene eine dünne Schicht hochverdichtetes Material liegt. Sie ist dünn, da orthogonal zu dieser Richtung kein Strahlartefakt auftritt. Dort liegt also in flacher Form das Platin vor.

Abb. 25G Die Kabel des Heizelementes und des Pt100 liegen mittig in dem Mantel der Heizpatrone.

Der Scan lässt erkennen, dass es sich bei dem verbauten Pt100 um einen Dünnschicht-Messwiderstand handeln muss. Das Platin selbst ist im Scan nicht sichtbar, da es eine zu geringe Dicke aufweist, kann aber indirekt über das Strahlartefakt, welches es hinterlässt nachgewiesen werden (Abb. 25F). Bei einem Dünnschicht-Pt100-Messwiderstand handelt es sich, um eine etwa 1 μm dicke Platin-Schicht, welche auf eine Keramikunterlage aufgedampft wird und nachfolgend mittels Photolithographie funktionalisiert wird. Das Gebilde wird ergänzt durch eine Schutzschicht [38]. Da die Auflösung bei diesem Scan bei etwa 87 μm lag, ist die Platinschicht nicht sichtbar.

⁶ Das Strahlartefakt ist der verdunkelte Bereich, der einem beidseitigen Schatten ähnelt.

11.2. Simulationstaugliches Modell der Heizpatrone

Die Heizpatrone möglichst realitätsnah nachzubilden, ist für die thermischen Simulationen nicht zielführend.

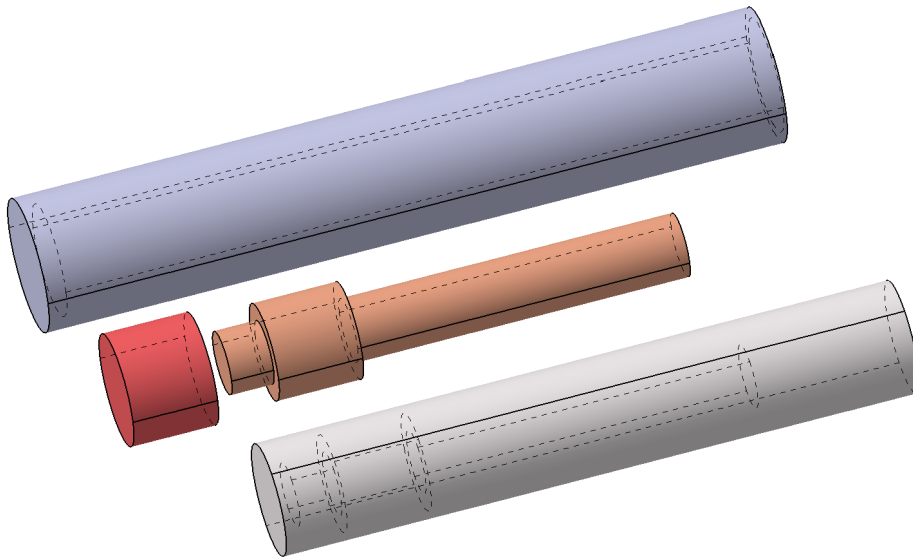


Abbildung 26: Explosionsgrafik des simulationstauglichen Heizpatronenmodells, Temperatursensor (rot), Heizelement (orange), MgO-Isolation (beige) und Patronenmantel (grau)

Das Heizelement (Abb. 26, orange) wird als zylinderförmiges Objekt mit Stufe moduliert. Die Geometrie ist mit der des Wickelkörpers kongruent und die Lage der zylindrischen Mantelflächen stimmen mit der Position des NiCr 80/20-Heizdrahtes überein. Dieser wird selbst nicht eingebracht, da seine Ausmaße zu gering sind. Der dort erzeugte Wärmestrom wird als Wärmestromdichte an die Mantelflächen des Zylinders und die Flächen der Verbreiterung angelegt. Über die Verbreiterung wird die lokale Heizleistungsverstärkung der Heizpatrone nachgebildet, da so der Abstand zum Mantel geringer und der Durchmesser des Heizelementes größer ist. Bezogen auf den Querschnitt ist die eingebrachte Wärmemenge pro Zeiteinheit bei einem größeren Umfang höher, da überall die gleiche Wärmestromdichte anliegt. Die Oberfläche des Heizelementes, an denen die thermischen Lasten anliegen, beträgt $244,195 \text{ mm}^2$. Bei einer Heizleistung von beispielsweise $1,044 \text{ W}$ entspricht dies einer Wärmestromdichte von etwa 4275 W/m^2 .

Die Geometrie des Pt100 (Abb. 26, rot) wird vernachlässigt. Am Boden der Heizpatrone wird ein den Mantel vollständig ausfüllender Zylinder eingebracht. Der Mittelpunkt der Grundfläche des Zylinders, welche in Richtung Heizelement weist, stimmt mit der Position des Pt100 überein. Dort wird bei der Simulation mittels einer Temperaturstichprobe die Sensortemperatur T_{Sim} abgenommen.

Die Kabelverbindungen innerhalb der Heizpatrone zu simulieren, wäre kontraproduktiv. Da die Kabel im Inneren des Heizelements verlaufen, haben sie eine geringe Auswirkung auf die Temperaturverteilung. Das Einbringen der Kabel in die Simulation erhöht die benötigte Netzfeinheit unnötig. Ebenso wird die Abrundung am Boden des Mantels (Abb. 26, grau) entfernt, da dies die Elementanzahl im anliegenden Körper unnötig erhöht.

Bei der Materialzuweisung wird die isotrope thermische Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl dem Mantel zugeordnet. Für die restliche Geometrie der Heizpatrone wird MgO mit einer temperaturabhängigen Kennlinie zugewiesen. Es wird nicht berücksichtigt, dass das MgO in fester Form (Wickelkörper) und in Pulverform (MgO-Isolation (Abb. 26, beige)) eine unterschiedliche Dichte besitzt und somit zwangsläufig eine andere Wärmeleitfähigkeit aufweisen muss. Die Pt-, Ni-, Cr- und Cu-Massenanteile an der Heizpatrone sind so gering, dass sie für den Wärmefluss kaum von Bedeutung sind. Weswegen sie ebenfalls nicht berücksichtigt werden.

Die Heizpatrone steht hinten aus der Hülse (violett, vgl. Abb. 27 und Abb. 34) hervor. Da an diesem überstehenden Teil der Mantelfläche A_2 softwarebedingt keine Konvektion angelegt werden kann, wird diese auf die Fläche der Rückseite A_1 der Heizpatrone verlegt. Diese Vereinfachung erspart bei der Simulation eine zusätzliche Komponente. Der zu untersuchende Temperaturverlauf im vorderen Bereich der Leitungskomponenten wird dadurch nicht beeinflusst, da die Vereinfachung auf der anderen Seite des Heizelementes liegt. Für den Wärmestrom der beiden Bereiche \dot{Q}_Σ gilt

$$\dot{Q}_\Sigma = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \alpha A_1 \Delta T_1 + \alpha A_2 \Delta T_2 \quad (25)$$

mit $\Delta T_1 = \Delta T_2$ folgt

$$\frac{\alpha_\Sigma}{\alpha} \sim \frac{\dot{Q}_\Sigma}{\dot{Q}_1} = \frac{\alpha \Delta T (A_1 + A_2)}{\alpha \Delta T A_1} \quad (26)$$

und somit ergibt sich für α_Σ :

$$\alpha_\Sigma = \alpha \frac{A_1 + A_2}{A_1} \quad (27)$$

Da die Flächen A_1 und A_2 bei den Simulationsmodellen des Prototypen und der Anwendungsausführung gleich sind gilt $\alpha_\Sigma \approx 4,175 \alpha$. So wird unter der Voraussetzung, dass die Temperaturunterschiede gleich sind der fehlende Bereich über die Rückseite kompensiert.

Dieses Modell (Abb. 26) der Heizpatrone wird für die Simulation des Prototypen sowie die der Anwendungsausführung benutzt. Um bei einem Vergleich den Einfluss der Hülse bestimmen zu können, muss die Heizpatrone in beiden Fällen gleich sein.

11.3. Simulationstaugliches Modell des Prototypen

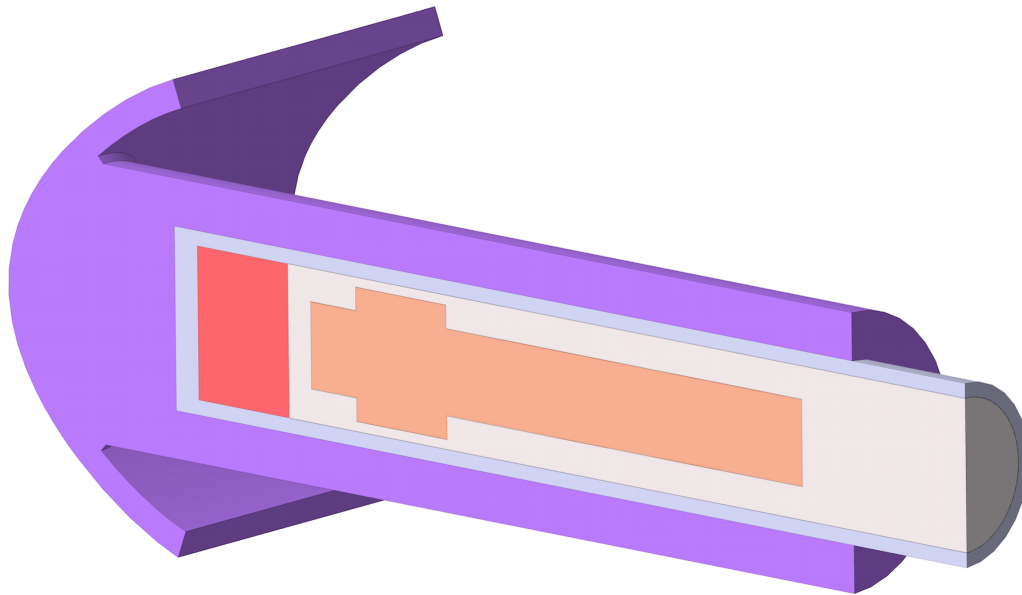


Abbildung 27: Simulationsversion des Prototypen (XZ-Schnitt), Temperatursensor (rot), Heizelement (orange), MgO-Isolation (beige), Patronenmantel (grau) und Hülse (violett)

Das Rechengebiet besteht aus der Heizpatrone (Abb. 26) und der Hülse (Abb. 27, violett). Alle anderen Komponenten des Prototypen (Abb. 9) werden außer Acht gelassen. Dies geschieht zum einen, um die Komplexität des Rechengebietes gering zu halten und so die numerische Größenbeschränkung des FEM-Programms nicht zu überschreiten. Zum anderen sind die thermodynamischen Prozesse in der Umgebungsluft so komplex, dass eine multiphysics simulation aus thermischer und CFD-Simulation nötig wären, um diese Prozesse abzubilden. Die für den Detektor maßgeblichen thermischen Prozesse spielen sich in den Leitungskomponenten ab.

Da die Randbedingungen an den Oberflächen des Rechengebietes nicht bestimmt werden können, wird für diese eine Abschätzung vorgenommen.

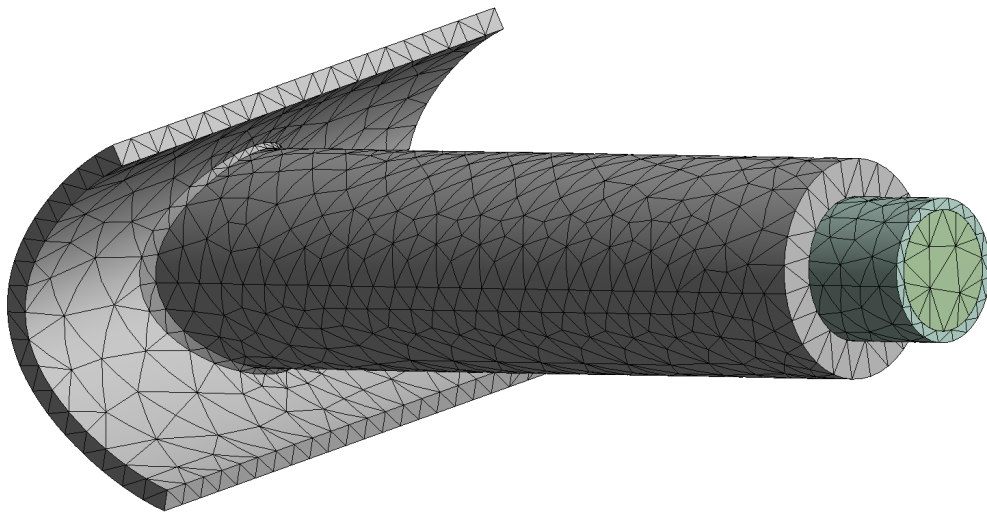


Abbildung 28: Prototyp: Vernetzung des Rechengebietes bei *mittlerer* Feinheit

Damit dieses Modell (Abb. 28) besser zu vernetzen ist, wurden einige Geometrieveränderungen an der Hülse vorgenommen.

Da die thermischen Eigenschaften des Klebstoff-Wärmeleitpaste-Gemisches nicht bekannt sind, wird der Spalt (Seite T) für die Klebeverbindung zwischen Mantel und Hülse entfernt. Um die Elementanzahl weiter zu reduzieren, wird auf die Verrundungen am Rand des Messtellers und am Boden der Bohrung (vgl. Kapitel A.2) verzichtet. Damit keine Schwierigkeiten bei der Vernetzung an der gebogenen Kontaktfläche zwischen Messteller und dem Rest der Hülse auftreten, werden beide Körper zu einem Teil zusammengeführt. Dieser Übergang wird mit einer 45° Fase mit 0,5 mm Kantenlänge versehen.

11.4. Simulation des Prototypen

An dem simulationstauglichen Modell (Abb. 27) des Prototypen werden verschiedene numerische Analysen durchgeführt, um die thermischen Prozesse im Detektor zu untersuchen.

11.4.1. Anfängliche Simulationen

Es werden thermisch-stationäre Simulationen zur ersten Analyse des Prototypen durchgeführt. An der Vorderfläche des Messtellers wird ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient α von $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ zugewiesen und die restlichen Flächen der Hülse erhalten ein geschätztes α von $50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Somit fallen an der Rückseite etwa 29% des Gesamtwärmestroms der Modelloberfläche ab. Am Heizelement (Abb. 26, orange) wird eine Wärmestromdichte q von 4650 W/m^2 angelegt, was einem Wärmestrom von 1,14 W entspricht. Die Start- und Außentemperatur liegt bei -20°C . Die Materialzuweisung für die Heizpatrone erfolgt wie in Kapitel 11.2 beschrieben. Wird der Hülse eine geringe Wärmeleitfähigkeit, wie die von PTFE ($\lambda_{PTFE} = 0,25 \text{ W/mK}$ [23]), zugewiesen, ergibt sich im Vergleich mit Aluminium

($\lambda_{Al} = 237,5 \text{ W/mK}$ [23]) ein unterschiedlicher Temperatur- und Wärmestromdichteverlauf (Abb. 29).

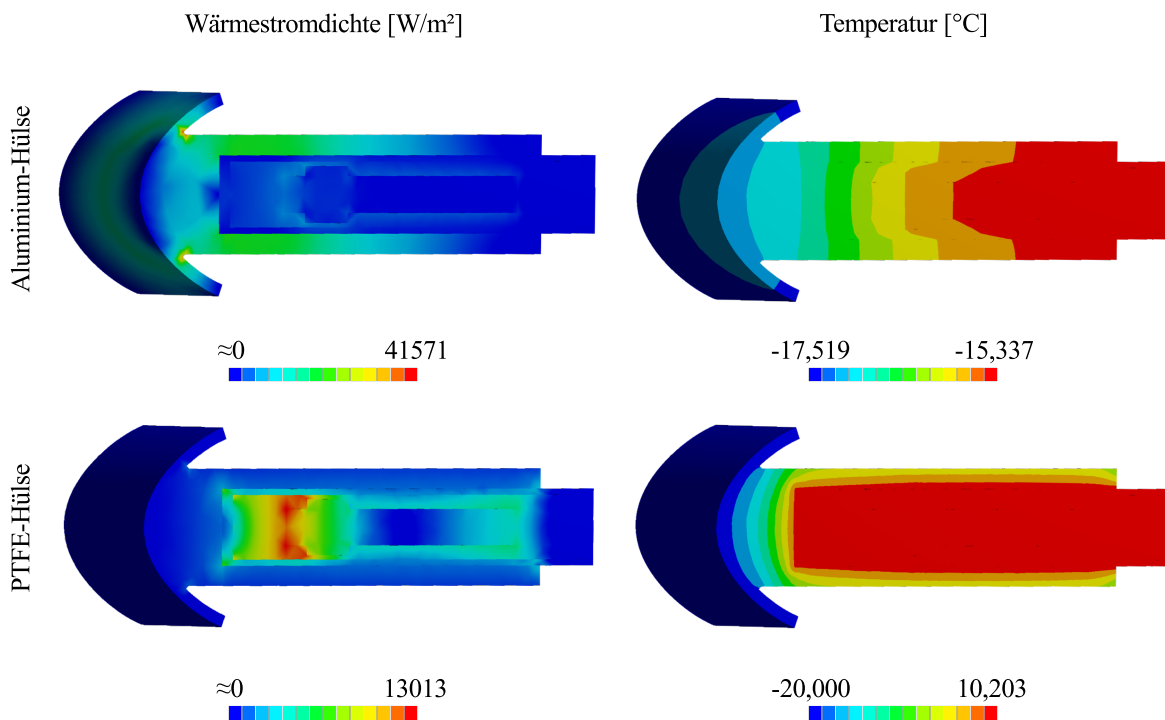


Abbildung 29: Prototyp: Wärmestromdichte- und Temperaturverlauf unterschiedlich leitfähiger Hülsen, Skala nicht übereinstimmend, vgl. Abb. 35

Bei einer hohen Wärmeleitfähigkeit des Hülsenmaterials (Abb. 29, oben) kann das Heizelement seine Wärme besser über den Bypass an den Messteller weiterleiten, als bei einer geringen Leitfähigkeit (Abb. 29, unten). Bei einer Aluminiumhülse ist die Wärmestromdichte innerhalb der Heizpatrone gering, die höchste Wärmestromdichte befindet sich an der Kerbe zwischen Bypass und Messteller (Abb. 30). Dort fließt die Wärme in die äußeren Bereiche des Messtellers ab. Innerhalb des Heizelementes findet kaum ein Wärmeaustausch statt, da die begrenzenden Flächen die gleiche Wärmestromdichte zugewiesen bekommen haben. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Edelstahl des Heizpatronenmantels, sind die dortigen Bereiche ebenfalls mit nur geringen Wärmestromdichten belegt. Dies ist der Grund für die ungleichmäßige Kontur des Temperaturgradienten bei einer hohen Leitfähigkeit der Hülse. Der Temperaturgradient bildet sich zwischen Heizelement und Messteller aus (vgl. Abb. 6). Da dieser am Temperatursensor zur Eisdetektion benötigt wird, sollte die Hülse aus gut wärmeleitfähigem Material sein.

Besteht die Hülse aus einem schlecht wärmeleitfähigem Material, befindet sich die größte Wärmestromdichte zwischen Heizelement und Temperatursensor. Wegen der Isolationswirkung der Hülse, ist hier nur ein geringer Wärmestrom außerhalb der Heizpatrone zu finden. Dies zeigt auch der Temperaturverlauf. Der Temperaturgradient bildet sich am Mantel der Heizpatrone aus, sodass am Temperatursensor kein Gradient vorliegt. Eine

Eisanlagerung hätte keine Auswirkung auf die Sensortemperatur, da diese von dem Heizelement zu stark dominiert wird. Der Messteller ist hingegen fast vollständig von der Heizpatrone isoliert.

Bei einer Hülse, mit hoher Wärmeleitfähigkeit, formen die Bereiche, der höchsten Wärmestromdichte im Bypass, einen Hohlzylinder um den Pt100 und erstrecken sich von dort aus über die Kerbe, zwischen Messteller und dem Rest der Hülse. Hier erreichen sie ihr Maximum. Der Bereich, den die Lanze einnehmen würde, weist hingegen nur eine geringe Wärmestromdichte auf (Abb. 30). Jedoch ist gerade für einen leistungsfähigen Detektor die Anbindung des Temperatursensors an den Messteller wichtig. Zudem würde die Kerbe thermisch entlastet.

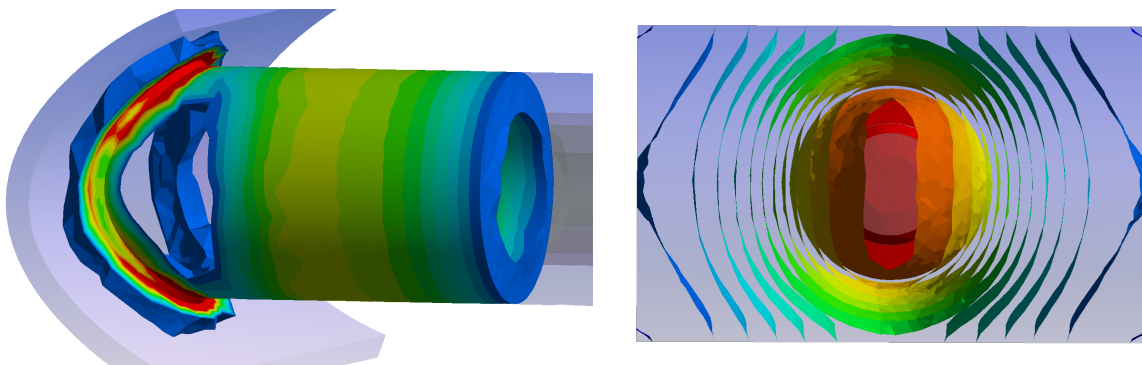


Abbildung 30: Prototyp: Bereiche der höchsten Wärmestromdichte (links), 14541 W/m² (blau) bis 41571 W/m² (rot), vgl. Abb. 36 und Temperatur-Isoflächen im Messteller (rechts), -17,519°C (blau) bis -15,337°C (rot), vgl. Abb. 37

Durch die mittige Wärmeeinleitung in den Messteller ergibt sich in ihm eine ringförmige konzentrische Anordnung der Temperatur-Isoflächen (Abb. 30). Zur gleichmäßigen Ausnutzung bietet es sich daher an, den Messteller rund zu formen.

11.4.2. Simulation: Variation der Konvektion/Heizleistung

Bei einsetzender Eisbildung erhöht sich zunehmend der Wärmewiderstand und so verringert sich der Wärmeübergangskoeffizient α . Dies ist der Grund, warum eine Eisanlagerung über eine Variation von α simuliert werden kann.

Es wird eine thermisch-stationäre Simulation am Prototypen mit verschiedenen Heizleistungen und Wärmeübergangskoeffizienten am Messteller durchgeführt.

Als Material wird für die Hülse Aluminium zugewiesen, für den Mantel Edelstahl und für die restlichen Komponenten MgO (vgl. Seite IX). Die Start- sowie die Außentemperatur T_0 beträgt -20°C. An den hinteren Bereichen der Hülse wird ein α von 50 W/m²K angenommen und, nach der Gleichung 27 entsprechend, wird an der Rückseite der Heizpatrone ein Wert für α von 208,73 W/m²K angelegt. An der Position des Pt100 wird per Temperaturstichprobe die Sensortemperatur $T_{Sim,P}$ bestimmt (Abb. 26, rot). Die Heizleistung wird wie in den vorangegangenen Simulationen auf die Mantelflächen und bei der

Heizleistungsverstärkung als Wärmestromdichte angelegt (Abb. 26, orange). Das α am Messteller und die Heizleistung werden variiert. Die sich einstellende Sensortemperatur wird aufgezeichnet (Abb. 31).

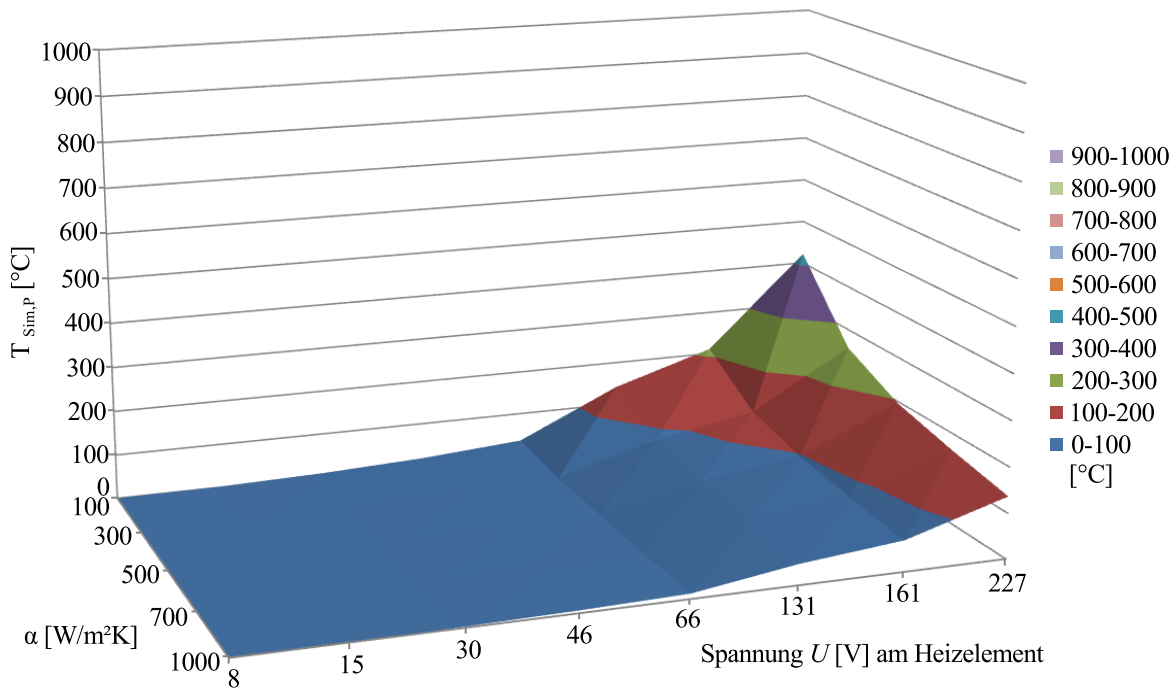


Abbildung 31: Prototyp: stationäre Sensortemperatur $T_{Sim,P}$ bei variiertter Konvektion und Heizleistung, vgl. Abb. 38

Die sich stationär einstellende Temperatur T_{Sim} hängt von der Konvektion mit α und T_0 sowie von der Heizleistung \dot{Q} ab. Diese wird bei konstantem Widerstand $R_{el} = 862 \, \Omega$ über die Spannung U beschrieben (vgl. Gl. 16 und 19). Die Konvektion hängt in diesem Fall nur von α ab, da die Außentemperatur T_0 konstant ist.

Berechnet man den Quotienten aus dem End- und Anfangswert einer beliebigen Messreihe für α erhält man stets den gleichen Wert. Selbiges gilt analog für die Heizspannung.

Die gleiche Simulation wird in Kapitel 11.6.2 mit der Anwendungsausführung durchgeführt und die Ergebnisse in Kapitel 11.7 nachfolgend miteinander verglichen.

11.4.3. Simulation: Oberflächenvergrößerung

Durch eine wachsende Eisanlagerung vergrößert sich die Oberfläche der Eis/Luft-Grenzfläche. Zur Untersuchung dieses Effektes wird eine thermisch-stationäre Simulation des Prototypen durchgeführt. Am Messteller wird dazu Eis in den Dicken 500, 1000, 2000 und 3000 μm und einmal zusätzlich 6500, 10000, 15000 und 20000 μm als Volumenkörper eingebracht. Die obere und untere Kante des Eises wird mit einer 45° Fase versehen, damit die Form eher der einer Raueisanlagerung entspricht.

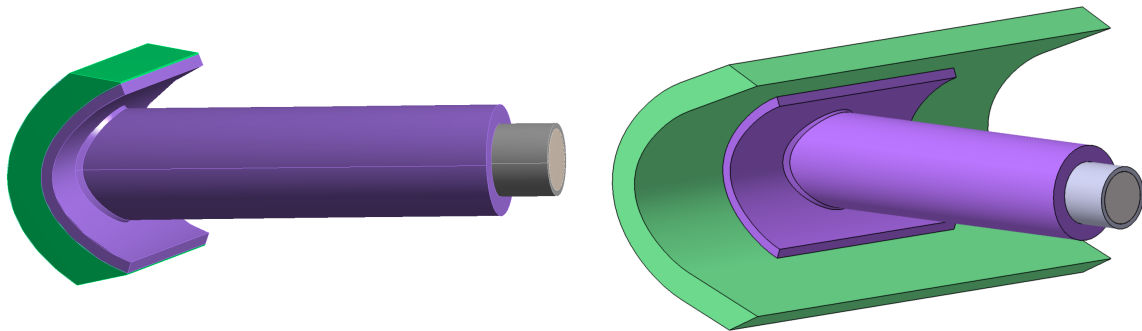


Abbildung 32: Prototyp: Modelle zur Simulation der Oberflächenvergrößerung durch eine Eisanlagerung (hier: 3 mm), geringer (links) und hoher (rechts) Effekt der Oberflächenvergrößerung des Eises, Eis (grün), Hülse (violett), Patronenmantel (grau) und MgO-Isolation (beige)

Die Simulation wird an zwei Varianten durchgeführt. Bei der einen Variante (Abb. 32, links) ist der Effekt der Oberflächenvergrößerung gering, da sich das Eis nur über dem Messteller befindet (vgl. Abb. 58), bei der anderen (Abb. 32, rechts) ist er größer, da sich das Eis über einem größeren Bereich (vgl. Abb. 59) ansammelt. Die Variante mit dem sich breiter anlagernden Eis bildet die Verhältnisse der Realität besser ab, da sich die Eisanlagerung auch umliegend an der Flügelvorderkante bildet (vgl. Abb. 60 und 61).

Für die Hülse wird Aluminium, für den Patronenmantel wird Edelstahl, für die Eisanlagerung wird die Wärmeleitfähigkeit von Eis und für die übrigen Komponenten wird MgO als Material zugewiesen. Die Außen- und Starttemperatur beträgt -20°C . Der Wärmeübergangskoeffizient α am Messteller bzw. an der Eis/Luft-Grenzfläche wird als konstant 500 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ angenommen (Abb. 32, grün). Auf der Rückseite des Eises (Abb. 32, rechts) wird keine Konvektion angelegt, da dort das PLA des Flügelprofils angrenzt und die Simulationen der beiden Varianten so vergleichbar bleiben. Auf der Rückseite der Hülse wird α mit 50 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ und an der Hinterseite der Heizpatrone mit 208,73 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ angenommen. Die Sensortemperatur wird an der hinteren Grundfläche des Zylinders erfasst, welcher den Temperatursensor verkörpert (Abb. 26, rot). Die Heizleistung wird als Wärmestromdichte an den Mantel- und Stufenflächen angelegt (Abb. 26, orange). Diese Randbedingungen gelten für beide Modellvarianten. Die Wärmestromdichte wird so eingestellt, dass für alle Eisdicken eine Temperatur von -5°C am Sensor erreicht wird. Da dies mitunter viele Iterationen erfordert, wurde die Netzfeinheit als *grob* gewählt.

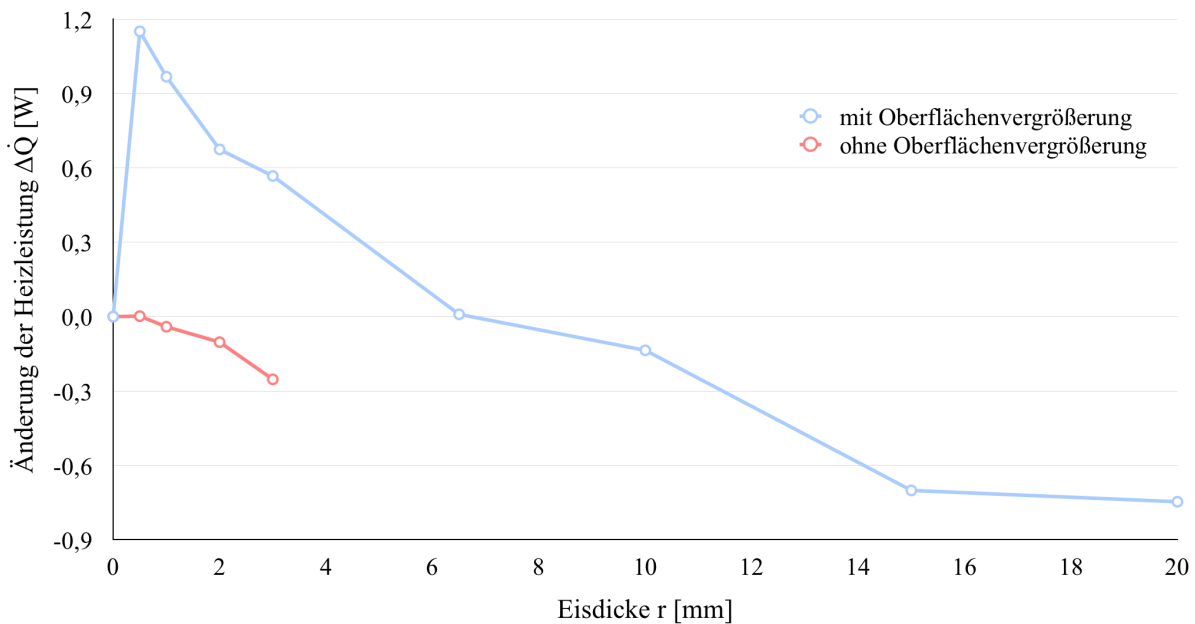


Abbildung 33: Prototyp: Zusammenhang zwischen Heizleistung \dot{Q} und Eisdicke r , geringer (rot) und hoher (blau) Einfluss der Oberflächenvergrößerung des Eises, simuliert

Bei zunehmender Eisdicke fällt, ohne den Effekt der Oberflächenvergrößerung (Abb. 32, links), die benötigte Heizleistung, um eine konstante Temperatur am Sensor aufrecht zu erhalten, quadratisch ab (Abb. 33, rot) und folgt in diesem Bereich dabei der Gleichung $\Delta\dot{Q} = -0,028r^2 - 0,0006r$ mit $R^2 = 99,29\%$. Dieser Graph beschreibt die Veränderung der Heizleistung, die durch die Isolationswirkung der zunehmenden Eisdicke hervorgerufen wird.

Bei den gleichen Randbedingungen ergibt sich unter Miteinbeziehen des Effektes der Oberflächenvergrößerung (Abb. 32, rechts) ein signifikant unterschiedlicher Verlauf des Simulationsergebnisses (Abb. 33, blau). Bei einer beginnenden Eisanlagerung über den Messteller hinaus vergrößert sich die wirksame Oberfläche abrupt. Diese zusätzliche Oberfläche entzieht dem Heizelement eine entsprechend größere Wärmemenge. Daher steigt die benötigte Heizleistung in der Simulation bei der dünnsten Eisschicht sprunghaft an. Die Isolationswirkung der Anlagerung ist zu Beginn der Eisbildung aufgrund der geringen Dicke des Eises kaum vorhanden (vgl. Abb. 33, rot). Daher ist der Effekt der Oberflächenvergrößerung hier einflussnehmender auf das Ergebnis. Mit zunehmender Dicke kompensiert die Isolationswirkung des Eises den Anstieg der Heizleistung und gewinnt an Bedeutung, da die Oberfläche nur noch geringfügig zunimmt. Daher fällt die benötigte Heizleistung bei einer ansteigenden Eisdicke ab, schneidet den Ausgangswert, bei dem kein Eis vorliegt und fällt sogar noch weiter ab, bis sich ein Endwert einstellt.

Bei der Variante ohne eine Oberflächenvergrößerung (Abb. 33, rot) ist bei der dünnsten Eisschicht ebenfalls ein geringfügiger Heizleistungsanstieg erkennbar, der auf einen minimalen Oberflächenzuwachs hindeutet.

11.5. Simulationstaugliches Modell der Anwendungsausführung

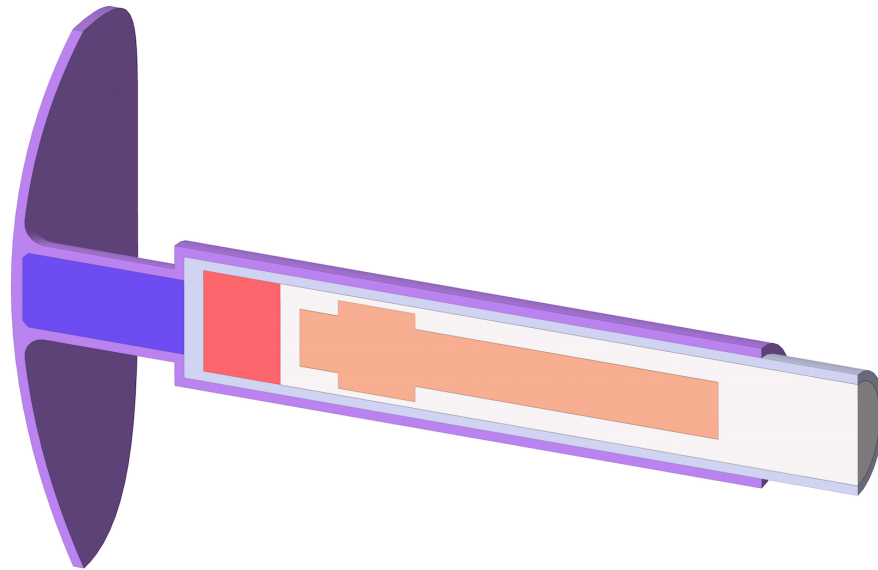


Abbildung 34: Simulationsversion der Anwendungsausführung (XZ-Schnitt), Temperatursensor (rot), Heizelement (orange), MgO-Isolation (beige), Patronenmantel (grau), Hülse (violett) und Lanzenkern (blau)

Analog zum Prototypen-Modell muss die Anwendungsausführung für die Simulation auf die Leitungskomponenten reduziert werden (Seite 45). Um die Komplexität des Rechengebietes und somit die Elementanzahl gering zu halten, werden die Verrundungen am Übergang zwischen Lanze und Bypass sowie die Verrundung am Übergang zwischen Mantel und Bypass entfernt. Der Vernetzungsgrad ist auf *mittel* eingestellt.

Das Simulationsmodell der Anwendungsausführung unterscheidet sich von dem des Prototypen durch die Hülse. Diese verfügt über eine Lanze, einen vergrößerten und dünneren Messteller und der Bypass ist mit einer Dicke von 0,5 mm dünner als beim Prototypen. Die Lanze besitzt zusätzlich einen Lanzenkern, einen Bereich mit höherer Leitfähigkeit, hier aus Kupfer, um die Lanze leitfähiger zu machen. Die Hülse besteht wie beim Prototypen aus Aluminium.

Die Heizpatrone ist in beiden Modellen identisch (Seite 43). Die Länge, mit der die Heizpatrone aus der Hülse hervorsteht, ist in beiden Fällen gleich.

Die Anwendungsausführung ist mit einer besseren Isolation ausgestattet, daher wird nicht wie beim Prototypen mit 29% sondern nur mit $\varphi=5\%$ für den über die Rückseite A_2 abgegebenen Wärmestrom simuliert. Diese Prozentangaben beziehen sich jeweils auf einen Wärmeübergangskoeffizienten α_1 von $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ an der Vorderfläche des Messtellers A_1 . Es gilt:

$$\alpha_1 \cdot A_1 \cdot \varphi = \alpha_2 \cdot A_2 \quad (28)$$

11.6. Simulation der Anwendungsausführung

An dem Modell (Abb. 34) werden unterschiedliche Simulationen durchgeführt.

11.6.1. Anfängliche Simulationen

Bei der thermisch-stationären Simulation beträgt die Start- und Umgebungstemperatur $T_0 = -20^\circ\text{C}$. An der Vorderseite wird ein Wärmeübergangskoeffizient von $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ und am Heizelement wird, eine der Heizleistung von 1 W entsprechenden, Wärmestromdichte angelegt. Für die Rückseite der Hülse wird die Konvektion mit $\alpha = 9,64 \text{ W/m}^2\text{K}$ und an der Patronenrückseite mit $40,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ festgelegt. Die Hülse ist aus Aluminium und der Lanzenkern aus Kupfer. Die Materialzuweisung der Heizpatrone erfolgt wie üblich (Kapitel 11.2). Der Vernetzungsgrad ist auf *mittel* eingestellt.

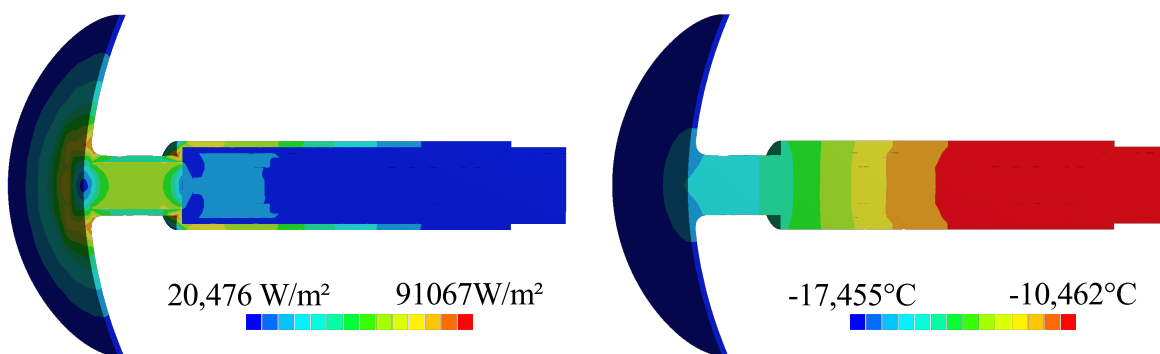


Abbildung 35: Wärmestromdichte- (links) und Temperaturverlauf (rechts) in der simulierten Anwendungsausführung, vgl. Abb. 29

Die Verteilung der Wärmestromdichte zeigt, dass durch den besser leitenden Lanzenkern der Pt100 mehr an den Messteller gekoppelt ist (Abb. 35, links). Der Edelstahlmantel der Patrone fungiert als Isolation zwischen dem Bypass und dem Pt100 und separiert somit die beiden dortigen Wärmeströme voneinander.

Wegen der besseren Isolation, weist der hintere Bereich der Heizpatrone eine nahezu gleiche Temperatur auf (Abb. 35, rechts) und dient so als Wärmespeicher. Der Großteil des Temperaturgradienten beginnt etwa bei der Hälfte der Heizpatrone und endet vor der Lanze. Der Temperatursensor liegt ausgehend vom Eis relativ weit vorne im Temperaturgradienten. In der Lanze gibt es einen verhältnismäßig geringen Temperaturabfall. Der äußere Bereich der Lanze wird vom Lanzenkern von Innen heraus auf die nahezu gleiche Temperatur gebracht. Deswegen findet man dort keine Kante in den Temperaturisolinen.

Die Bereiche der höchsten Wärmestromdichte befinden sich an den gleichen Stellen wie beim Prototypen (Abb. 36, links). Nach wie vor liegt das Maximum am Übergang zwischen Messteller und dem Rest der Hülse. Dort bündelt sich der Wärmefluss aus den äußeren Bereichen des Messtellers. Je weiter sich der Lanzenkern nach vorne in den Messteller erstreckt, desto mehr wird die Wärmestromdichte in diesem Bereich verringert. Aufgrund des Kupfers in dem Lanzenkern, wird die Wärme vom Bypass, über die Mitte

der Lanze, zum Messteller geleitet. Somit ist der Messteller thermisch besser mit dem Pt100 verbunden.

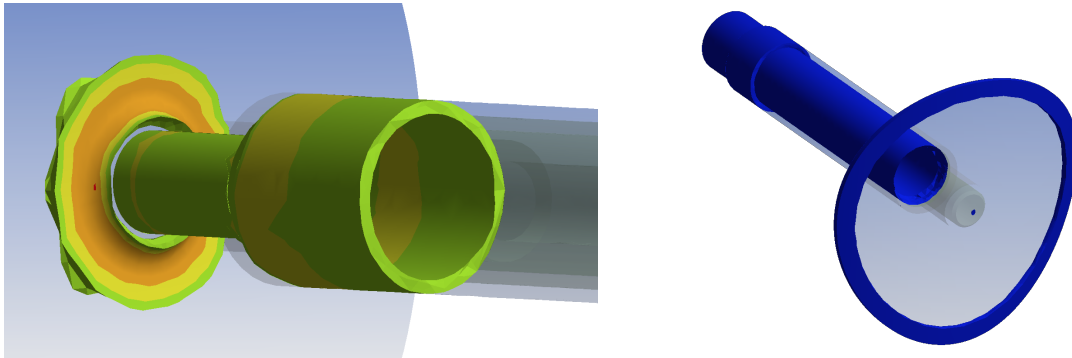


Abbildung 36: Anwendungsausführung: Bereiche der höchsten Wärmestromdichte (links), 54228 W/m^2 (grün) bis 97596 W/m^2 (rot), vgl. Abb. 30 und geringsten Wärmestromdichte (rechts), $17,906 \text{ W/m}^2$ bis $6726,4 \text{ W/m}^2$ (blauer Bereich)

In den Randbereichen und im Zentrum des Messtellers ist die Wärmestromdichte gering (Abb. 36, rechts). Diese Bereiche müssen nur die Wärme weiterleiten, die ihnen selbst entzogen wird und nicht zusätzlich auch die Wärmemenge, die an den nachfolgenden Bereichen entweicht. Zudem sind aufgrund der guten Isolation die hinteren Bereiche der Heizpatrone kaum mit einem Wärmestrom versehen. Der Mantel weist ebenso eine geringe Wärmestromdichte auf, da er aus Edelstahl mit einer geringen Leitfähigkeit ist.

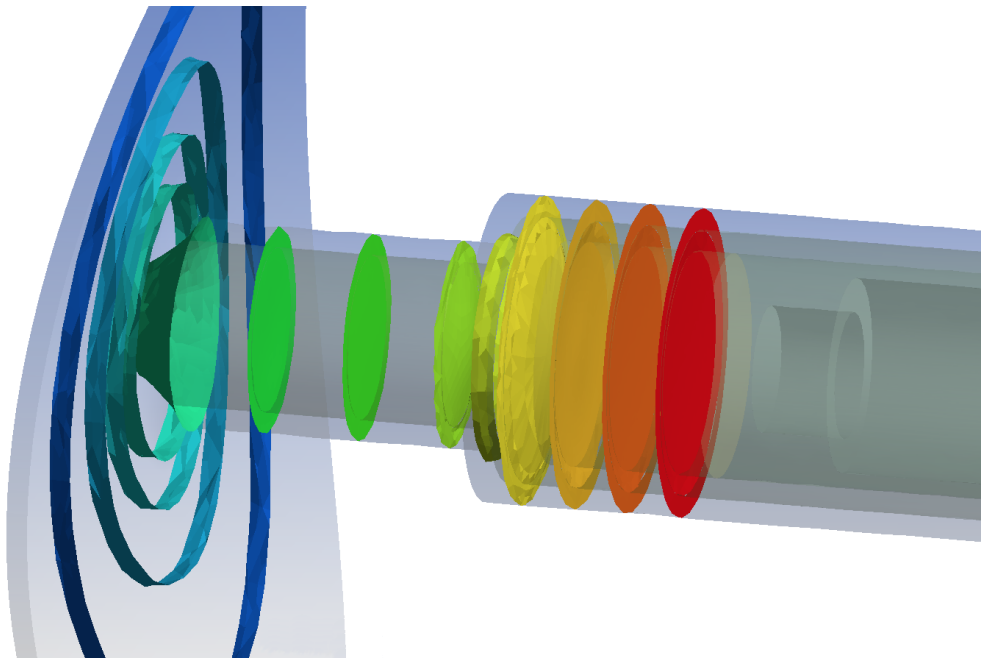


Abbildung 37: Temperatur-Isoflächen in der Lanze, Pt100 und im Messteller der Anwendungsausführung, $-18,75^\circ\text{C}$ (blau) bis $-11,154^\circ\text{C}$ (rot), vgl. Abb. 30

Die Temperatur-Isoflächen verlaufen im Messteller der Geometrie entsprechend (Abb. 37). Der Abstand zwischen den Isoflächen ist innerhalb der Lanze größer als in den anderen Bereichen, da dort durch den Kupferkern die Wärmeleitfähigkeit am höchsten ist.

11.6.2. Simulation: Variation der Konvektion/Heizleistung

Um die Leistungsfähigkeit der Ausführungsform mit der des Prototypens zu vergleichen, wird die gleiche Simulation wie in Kapitel 11.4.2 durchgeführt. Alle thermischen Randbedingungen sind gleich, mit Ausnahme der auf der Rückseite der Hülse ($9,6392 \text{ W/m}^2\text{K}$) und Hinterseite der Patrone ($40,239833 \text{ W/m}^2\text{K}$) befindlichen Konvektion. Diese beträgt hier statt 29% nur 5% des Wärmestroms, der über die Vorderseite des Messtellers bei einem α von $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ entzogen wird.

Der Wärmeübergangskoeffizient am Messteller und die Heizleistung werden variiert, die sich stationär ergebene Temperatur am Sensor $T_{Sim,A}$ dokumentiert (Abb. 38).

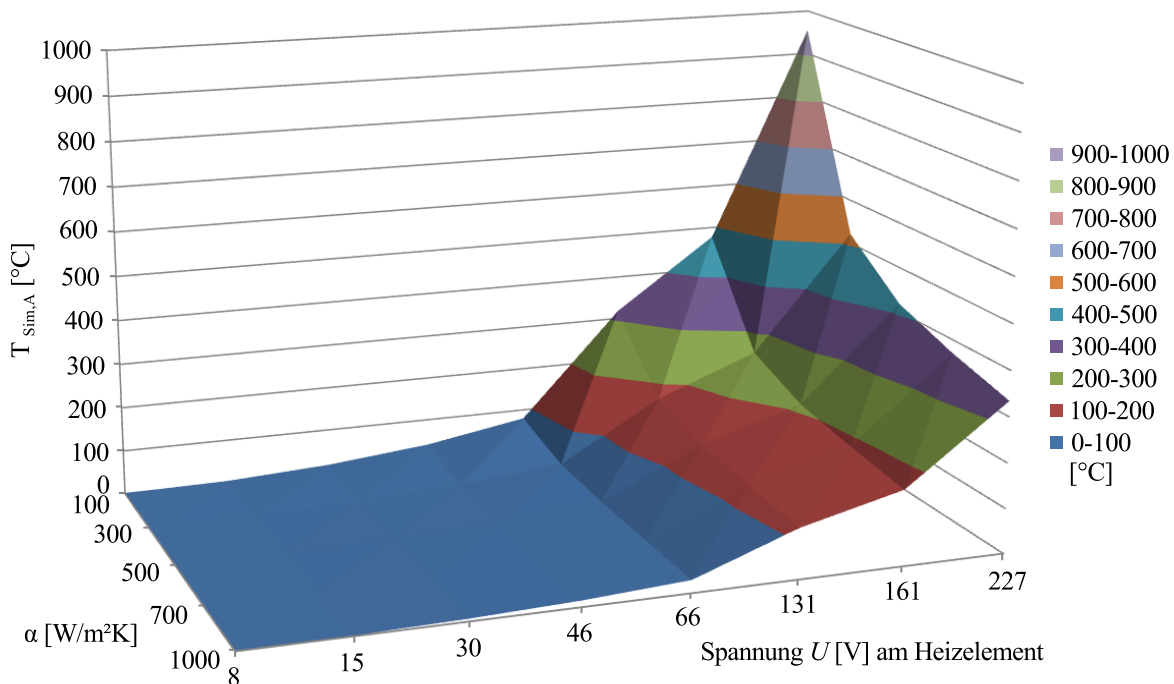


Abbildung 38: Anwendungsausführung: stationäre Sensortemperatur $T_{Sim,A}$ bei variiert Konvektion und Heizleistung, vgl. Abb. 31

Ebenso wie beim Prototypen liegt hier für jede Messreihe für α bzw. die Spannung U der gleiche Quotient aus End- und Anfangswert einer Messreihe vor.

11.7. Vergleich Prototyp/Anwendungsausführung

Die Anwendungsausführung unterscheidet sich vom Prototypen hauptsächlich durch die Lanze mit Kupferkern und die geringere Wandstärke der Hülse. Die Messtellerfläche ist nur um 3,6% größer als beim Prototypen.

Die Wärmestromdichte im Bereich der Lanze, bzw. im Bereich direkt hinter dem Messteller ist bei der Anwendungsausführung deutlich höher. Dadurch ist der Temperatursensor thermisch besser mit dem Messteller verbunden. Somit dürfte er auf eine Veränderung der Wärmeübergangseigenschaften an der Vorderseite des Messtellers in kürzerer Zeit reagieren als beim Prototypen.

Durch das Einbringen eines höher leitfähigen Lanzenkerns, wird der Wärmestrom im Bereich der Lanze und besonders am Übergang zwischen Messteller und dem Rest der Hülse homogener auf das vorhandene Material verteilt. Eine homogenere Wärmestromdichteverteilung in dem Messteller wird durch die Anpassung der Geometrie an den Verlauf der Temperatur-Isoflächen bewirkt. Aufgrund der Isolationswirkung des Patronenmantels, ist eine höhere Leitfähigkeit des Bypasses zu bevorzugen, da so eine Möglichkeit für die Wärmeleitung zwischen Heizelement und Messteller bzw. Lanze bereitgestellt wird. Die bessere Isolation der Leitungskomponenten bei der Anwendungsausführung ruft im Vergleich zum Prototypen eine höhere Temperatur am Heizelement hervor. Dies könnte zum frühzeitigem Überschreiten von Materialgrenzwerten führen.

Bei den Simulationen "Variation der Konvektion/Heizleistung" des Prototypen und der Anwendungsausführung ergeben sich unterschiedliche Kennflächen:

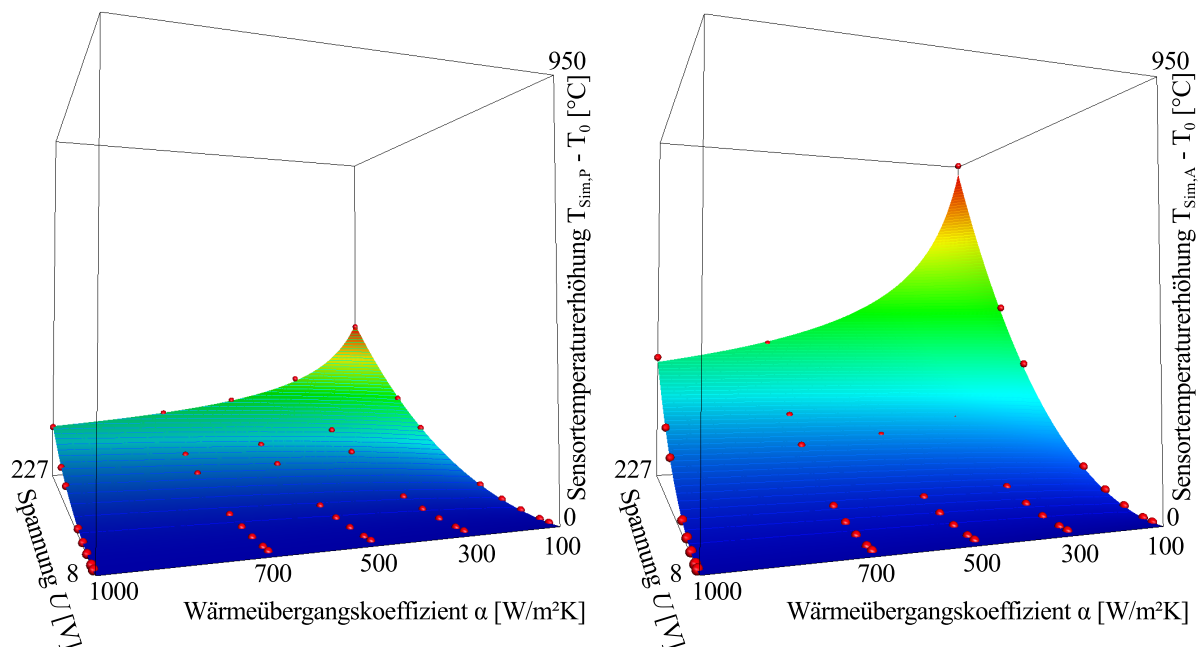


Abbildung 39: Interpolation der Simulationsergebnisse Prototyp (links) (Abb. 31) und Anwendungsausführung (rechts) (Abb. 38), Messwerte als rote Punkte, die Färbung der Flächen richtet sich nach der jeweiligen Steigung

Skaliert man die interpolierten Flächen (Abb. 39) auf die gleichen Randwerte, erkennt man einen unterschiedlichen Verlauf. Somit ist die Reaktion der Ausführungsformen auf eine Heiz- bzw. Konvektionsänderung, bezogen auf den gleichen Werteabschnitt, unterschiedlich.

Im Vergleich der beiden Ergebnisse erzielt die Anwendungsausführung höhere Temperaturen als der Prototyp bei der gleichen Heizleistung. Dies liegt an der besseren Isolation. Bei einer Änderung von α ergeben sich bei höheren Heizleistungen größere absolute Temperaturänderungen, somit ist der Detektor bei höheren Heizleistungen sensitiver.

Jedoch wird die maximale Heizleistung durch das Erreichen des Gefrierpunktes begrenzt. Dieser wird wegen der Isolation bei der Anwendungsausführung bereits bei geringeren Heizleistungen erreicht. Bezogen auf eine Heizleistung, die bei beiden Modellen zu einer Sensortemperatur führt, die gerade unter dem Gefrierpunkt liegt, ist die durch eine Veränderung von α herbeigeführte Temperaturänderung nahezu gleich. Bezogen auf die Praxis, bei der die Solltemperatur knapp unter dem Gefrierpunkt gehalten wird, sind somit beide Ausführungsformen ähnlich sensitiv.

Für die Kennflächen beider Ausführungsformen ergeben sich nach Interpolation anhand der Simulationsergebnisse (Abb. 39) folgende Gleichungen:

$$T_{Sim,P}(\alpha, U) = (0,08U^2 - 0,0517U) \cdot \alpha^{-0,490625} + T_0 \quad (29)$$

$$T_{Sim,A}(\alpha, U) = (0,1498U^2 - 0,1307U) \cdot \alpha^{-0,459625} + T_0 \quad (30)$$

Bei einem Koeffizientenvergleich dieser Gleichungen erkennt man, dass der Exponent von α nahezu gleich ist. Daher ist der Einfluss der Konvektion auf die Sensortemperatur ebenfalls nahezu gleich. Die Faktoren in den Termen, die ein U enthalten, unterscheiden sich. Daher ist der Einfluss der zur Spannung U proportionalen Heizleistung auf die Sensortemperatur T_{Sim} bei beiden Ausführungsformen verschieden. Möglicherweise ist die unterschiedliche Masse der Systeme der Grund dafür, da die Heizpatrone bei beiden Modellen gleich ist.

Bildet man aus dem End- und Anfangswert einer Messreihe (Abb. 39) den Quotienten ergeben sich jeweils die gleichen Werte. Bei einem Vergleich dieser zeigt sich, dass bei den Messreihen bei konstantem α bei beiden Ausführungsformen der gleiche Wert ermittelt wird. Für die an den Messreihen der Spannung ermittelten Quotienten ergibt sich ein unterschiedlicher Wert. Hierbei liegt dieser bei dem Prototypen um 8,75% höher als bei dem der Ausführungsform.

Im Vergleich zum Prototypen weist die Anwendungsausführung im Funktionsbereich (Abb. 12) des Detektors keine signifikant höhere Sensitivität gegenüber einer Veränderung der Konvektion auf. Jedoch kann sich aufgrund der andersartigen Konstruktion der Wärmefluss wie gewünscht verteilen (Abb. 35).

12. Eignungsprüfung

Die Versuche im Enteisungsprüfstand stellen den Prototypen auf die Probe, um dessen Funktionstüchtigkeit und Leistung aufzuzeigen.

12.1. Enteisungsprüfstand

Der Enteisungsprüfstand besteht aus der Tiefkühlkammer und dem Windkanal sowie der zugehörigen Mess- und Steuertechnik.

Die Tiefkühlkammer hat bei den Innenmaßen von $3 \times 3 \times 8 \text{ m}^3$ eine Kühlleistung von 24 kW. Der Wärmetauscher verfügt, um diese Kühlleistung zu erreichen, über einen Hubkolbenverdichter. Der zulässige Temperaturbereich erstreckt sich von 0°C bis -25°C . In der Tiefkühlkammer befindet sich der subsonische Windkanal mit geschlossener Messkammer und offenem Umlauf. Der Ventilator befindet sich hinter der Messstrecke, welche die äußeren Abmessungen von $80 \times 138 \times 30 \text{ cm}^3$ hat. Die angegebene maximale Strömungsgeschwindigkeit beträgt 40 m/s bei einer Nennleistung von 15 kW und einem Turbulenzgrad von unter 5%. Der Zusammenhang zwischen der am Windkanal angelegten Spannung und der sich einstellenden Windgeschwindigkeit ist linear und folgt der Gleichung $v = 4,1545u$ mit $R^2 = 99,85\%$, $\mathbb{D} = [0, 10]$, $\mathbb{W} = [0, 40]$.

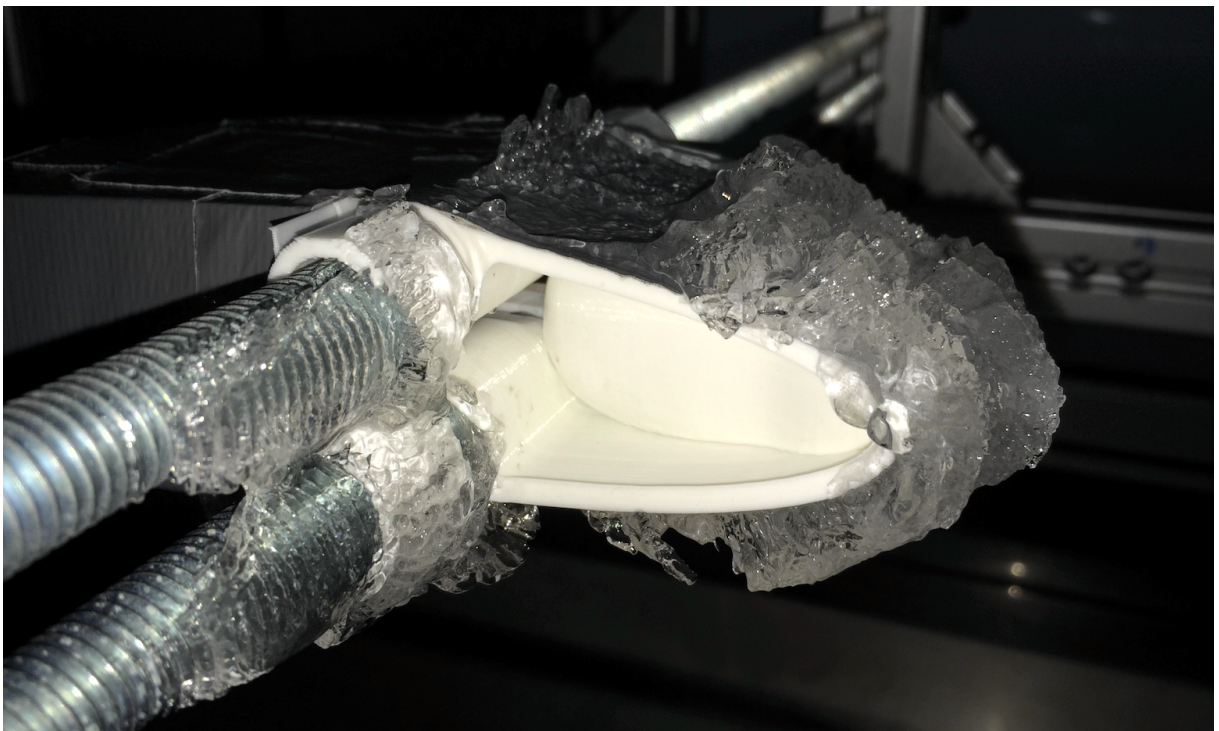


Abbildung 40: Massive Raueisbildung am Prototypen

Zur Vereisung befindet sich vor der Messkammer eine beheizte Einspritzvorrichtung mit Düse, über die vollentsalztes Wasser in der Mitte der Messkammer appliziert werden kann. Da die Versuche meistens zwischen -5 und -20°C und bei Windgeschwindigkeiten von etwa

33 m/s (8 V) durchgeführt wurden, entstand vorzugsweise Raueis (Abb. 40). Bei einer Versuchsreihe bei höheren Temperaturen entstand Klareis (Abb. 56). Um das entstandene Eis nach einem Versuch zu entfernen, wird manuell thermisch enteist.

Die für die Versuche benutzte Messtechnik besteht aus Videokameras, einem Druckdifferenzsensor und mehreren Temperatursensoren. An den Seiten der Messkammer befindet sich je ein horizontales Profil, an denen der Detektor mit zwei übereinander liegenden M12 Gewindestangen im Luftstrom montiert werden kann. Eine Kamera zur Überwachung ist seitlich auf das Profil gerichtet und ein Pt100-Temperaturfühler befindet sich hinter einer Gewindestange, um die Außentemperatur zu messen. Weiter seitlich in der Messkammer befindet sich der Temperaturfühler der Tiefkühlkammer.

12.2. Dämpfung des Systems

Im Vergleich zu dem industriell genutzten Pt100-Messfühler weist der Sensor der Heizpatrone einige Systemunterschiede auf. Da bei deaktiviertem Heizelement beide Sensoren von den gleichen Umweltparametern beeinflusst werden, kann man durch eine mathematische Transformation die Messreihe von T_{EPS} in die von T_{Sen} überführen. Es liegt eine Zeitverzögerung, ein positiver Offset und eine Glättung vor. Für einen Fall kann die Dämpfung beispielsweise über einen Offset von +0,155 K, eine Verzögerung von 13,4 s und einen gleitendes Mittel über 38,2 s beschrieben werden. Je geringer die Dämpfung ist, desto schneller reagiert der Detektor.

12.3. Temperaturmessung bei variabler Windgeschwindigkeit

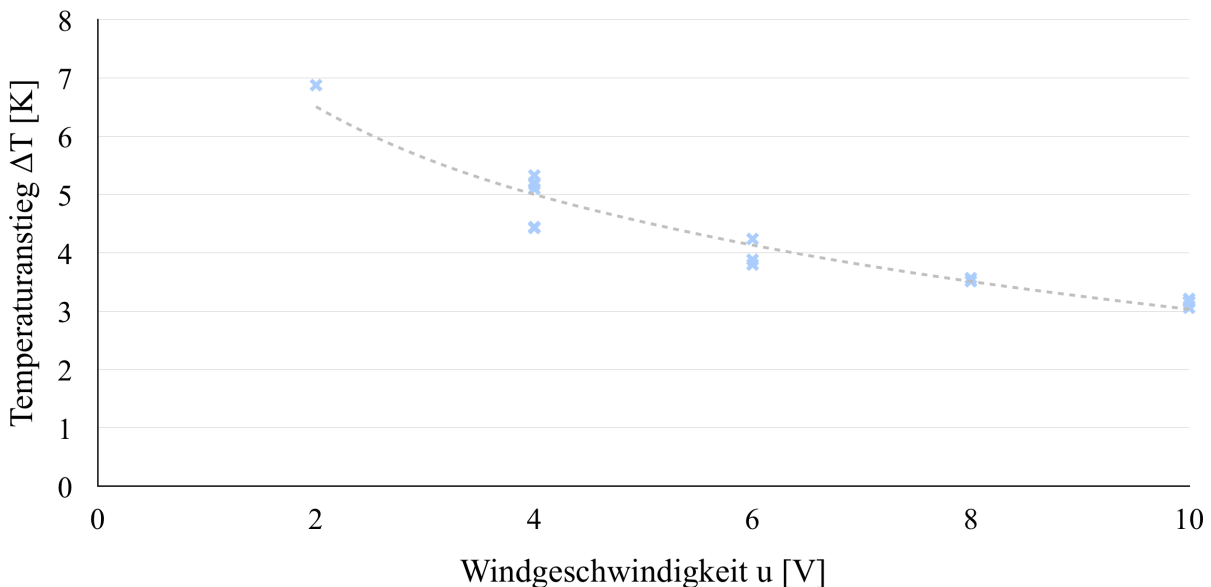


Abbildung 41: Windgeschwindigkeitsabhängigkeit der Temperaturerhöhung ohne Eis

Die Heizleistung wird bei 1,044 W konstant gehalten und die Windgeschwindigkeit variiert. Der sich einstellende Temperaturunterschied zwischen Sensor und Umgebung wird

gemessen (Abb. 41) (vgl. Gl. 15 und Abb. 17). Die Temperaturerhöhung ist von der Windgeschwindigkeit abhängig, jedoch nicht von der Umgebungstemperatur (Abb. 47). Diese Werte würden bei einer Messung mit Eis als Referenzwerte benötigt, um die eisin-duzierte Temperaturveränderung unabhängig von der Windgeschwindigkeit ermitteln zu können.

12.4. Temperaturmessung bei variabler Eisdicke

Zur ersten Überprüfung, ob das Detektorsystem überhaupt auf eine Eisanlagerung reagiert, wird eine Messung mit variabler Eisdicke und noch ohne Heizleistungsregelung durchgeführt.

Bei einer Eisanlagerung sollte die Temperatur am Temperatursensor steigen, da, durch den zunehmenden thermischen Widerstand des Eises, die Heizpatrone besser isoliert wird. Es wird eine konstante Spannung am Windkanal von 8 V (≈ 33 m/s) und eine konstante Leistung an der Heizpatrone von 1,044 W angelegt. Es wird sukzessive vereist, die Eisdicke mittels Messschieber gemessen, die Heizpatrone aufgeheizt und die sich einstellende Temperaturerhöhung aufgezeichnet. Ist die Eisdicke über ein bestimmtes Maß angewachsen, wird manuell thermisch enteist.

Für diese Messung werden keine windgeschwindigkeitsabhängigen Referenzwerte benötigt, da nur bei einer Windgeschwindigkeit gemessen wird. Um den Temperaturanstieg zu ermitteln, wird ΔT nach Gleichung 15 bestimmt.

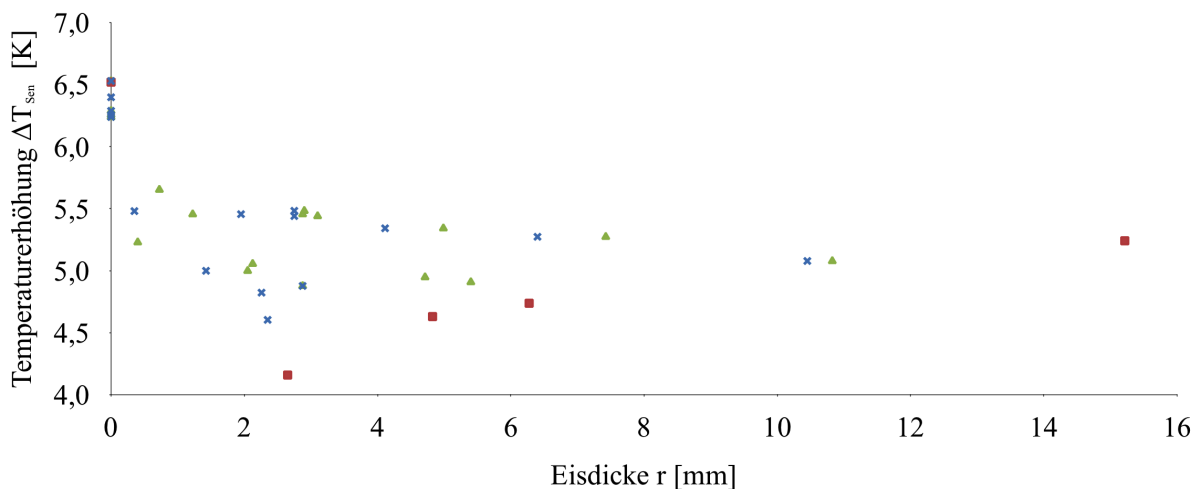


Abbildung 42: Stationäre Temperaturdifferenz bei konstanter Heizleistung und konstanter Windgeschwindigkeit anhand von drei Messreihen

Die Temperaturdifferenz ist am höchsten, wenn kein Eis vorliegt. Sobald eine dünne Eisschicht vorhanden ist, fällt die Temperaturerhöhung signifikant um etwa 1 K ab. Obwohl die Temperaturdifferenz mit zunehmender Dicke zu fallen scheint, kann kein verlässlicher Trend angegeben werden. Die rot markierte Messreihe scheint jedoch nach einem Minimum wieder anzusteigen.

Es liegt somit nicht der erwartete Temperaturanstieg bei zunehmender Eisdicke vor. Daher muss angenommen werden, dass ein oder mehrere Einflüsse die eisinduzierte Temperaturerhöhung überkompensieren. Die Isolationswirkung des Eises scheint hier wegen der Schwankung für die exakte Eisdickenbestimmung nicht gebräuchlich zu sein. Es ist sehr wohl möglich, dass eine bessere Ausführungsform als der Prototyp zur Eisdickenbestimmung fähig ist. Eine Detektion, also der Nachweis der Anwesenheit, kann mit dieser Methode verlässlich durchgeführt werden. Zudem erkennt man an dem unterschiedlichen Verlauf der Messreihen zueinander, das Problem verlässliche Referenzwerte für die Eisdickenbestimmung zu erzeugen. Außerdem besteht die Problematik die Eisdicke am Messsteller genau zu beziffern (Abb. 40).

Der entzogene Wärmestrom aufgrund der Oberflächenvergrößerung, die durch die Eisanlagerung hervorgerufen wird, bewirkt, dass bei dünnen Eissichten die Temperatur abfällt (vgl. Kapitel 11.4.3).

12.5. Heizleistungsmessung bei variabler Temperaturdifferenz

Die hier ermittelten Werte dienen als Referenzwerte für die spätere Eisdickenbestimmung über die Heizleistungsänderung.

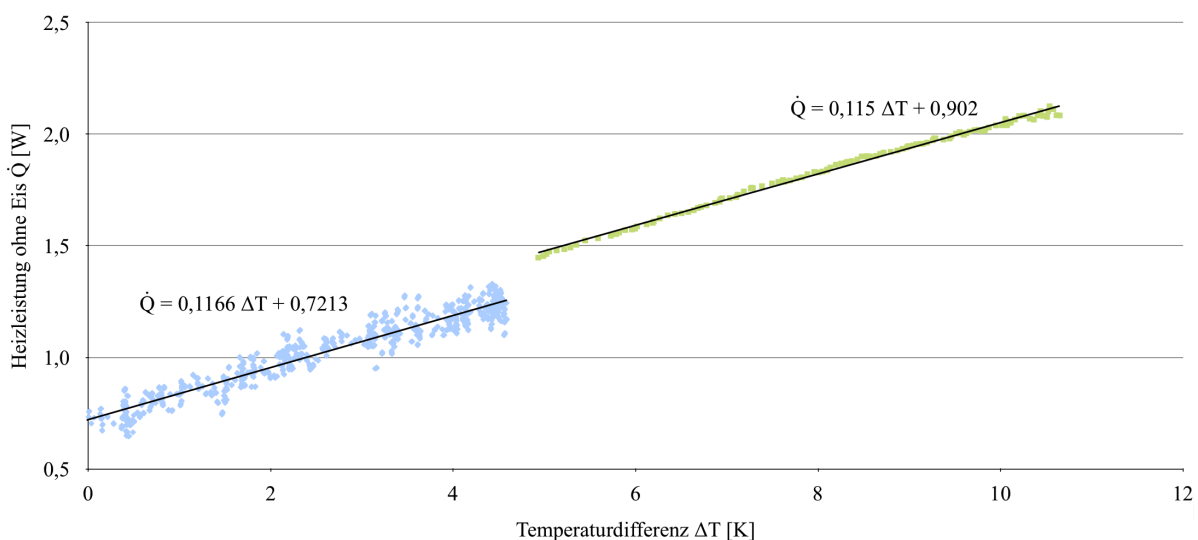


Abbildung 43: Temperaturdifferenzabhängiger Heizleistungsanstieg, zwei Messreihen

Bei einer Spannung von 8 V am Windkanal (≈ 33 m/s) und einer konstanten Solltemperatur von -5°C wird mittels der Tiefkühlkammer die Umgebungstemperatur heruntergekühlt, sodass die Temperaturdifferenz ΔT zwischen Sensortemperatur und Umgebungstemperatur steigt. So kann man die für eine bestimmte Temperaturdifferenz benötigte Heizleistung ermitteln, um diese als Nullwert bei einer Eisanlagerung zu nutzen.

Es wurde an zwei Tagen je eine Messreihe für verschiedene ΔT aufgenommen. Die sich ergebenden Regressionsgeraden dieser beiden Messreihen sollten übereinander liegen. Die Steigung ist zwar nahezu gleich, jedoch gibt es einen Offset zwischen den beiden Geraden. Dies zeigt die Schwierigkeiten der Bestimmung von verlässlichen Referenzwerten. Für die

spätere Korrektur der Messwerte mit Eis wird sich nur auf die grün markierte Messreihe bezogen, da diese überwiegend den benötigten Temperaturdifferenzbereich abdeckt (Abb. 43).

Die Aussage der Heizleistung für eine Detektion ist nicht mehr zu verwenden, falls sie entweder bei 100% oder 0% der möglichen Leistung anliegt. Dies gilt auch für den Fall, dass diese Werte nur zeitweilig erreicht werden, beispielsweise aufgrund der Schwingung der Heizleistung, die durch unzureichend eingestellte Reglerparameter verursacht werden kann. Zwar sollte sich in diesem Fall die Frequenz der Schwingung erhöhen, jedoch ist dies vermutlich wegen der Trägheit des Systems nicht in ausreichendem Maße der Fall. Daher fällt die über mehrere Perioden gemittelte Heizleistung, bei Erreichen eines Messwertes der 100% Grenze, stufenartig ab und kann ab da nicht mehr verwendet werden. Die blau markierten Werte zeigen, wie bei weniger gut geeigneten Reglerparametern die Amplitude der Schwingung zunimmt (Abb. 43).

12.6. Heizleistungsmessung bei variabler Eisdicke

Nun wird die Heizleistungsregelung genutzt, um nicht mehr die eisinduzierte Temperaturveränderung, sondern eine Heizleistungsveränderung als Messgröße zur Eisdetektion zu nutzen.

Bei einer Solltemperatur von -5°C und einer Spannung am Windkanal von 8 V ($\approx 33 \text{ m/s}$) wird sukzessive vereist und die Eisdicke per Messschieber ermittelt sowie die Heizleistung aufgezeichnet, wenn sie im Mittel einen stabilen Endwert erreicht hat. Da die Heizleistung eine Schwingung aufweist, wird über das Vielfache einer Periode gemittelt. Die Regelung muss die Sensortemperatur in der Toleranz um die Solltemperatur halten, damit das Ergebnis der Heizleistung eine gültige Aussage beinhaltet. Da nur bei einer Geschwindigkeit getestet wird, kann eine zusätzliche Geschwindigkeitsabhängigkeit der Referenzwerte und der Reglerparameter außer Acht gelassen werden.

Die Heizleistung sollte bei einer Eisanlagerung abfallen und mit zunehmender Eisdicke sich einem Endwert nähern. Bei keiner Eisanlagerung wird nur die Heizleistung benötigt, die dem Referenzwert bei diesem Temperaturunterschied entspricht (Abb. 44, Ursprungspunkt). Bei einer dünnen Eisanlagerung steigt die benötigte Heizleistung um etwa 300 mW an und fällt bei zunehmender Eisdicke wieder ab. Dieser Abfall erfolgt nicht linear, sondern weist Schwankungen auf (Abb. 44).

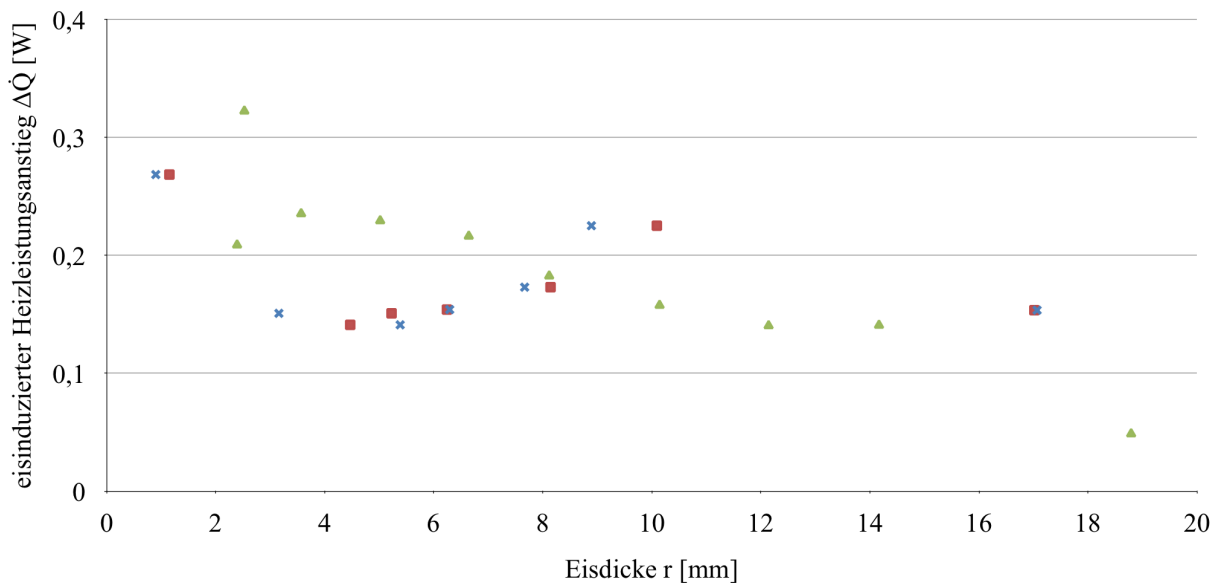


Abbildung 44: Eisinduzierter Heizleistungsanstieg, bereinigt um Temperaturdifferenzabhängigkeit anhand von Referenzwerten (Abb. 43, grün), drei Messreihen

Eine Eisdetektion ist durch die Überwachung der Heizleistung gut realisierbar, eine Eisdickenbestimmung jedoch mit dieser Ausführungsform nicht. Die Heizleistung steigt sprunghaft an und fällt dann bei zunehmender Eisdicke langsam ab. Daher muss neben dem Wärmewiderstand ein weiterer Einflussfaktor existieren. Dieser wird als der Effekt der Oberflächenvergrößerung identifiziert (vgl. Kapitel 11.4.3).

Da nicht nur das Eis, welches sich direkt über dem Messteller befindet, einen Einfluss auf den Detektor ausübt, muss das Eis an den Seiten bei der Betrachtung berücksichtigt werden. Daher ist auch der Effekt der Oberflächenvergrößerung zu beachten. Dieser verursacht bereits bei dünnen Eisdicken einen Zuwachs der Oberfläche. Diese führt zu einem Anstieg der Heizleistung, da die Grenzfläche schlagartig größer wird und ein höherer Wärmestrom entzogen wird. Ab da nimmt die Oberfläche nicht mehr so stark zu und die Isolationswirkung des Eises gewinnt an Bedeutung. Somit fällt die Heizleistung ab.

Zudem wurde ein Messpunkt bei einer Eisdicke von etwa 4 cm aufgenommen (Abb. 57). Die hierbei benötigte Heizleistung liegt, im Vergleich zum Referenzwert, bei $-77,9 \text{ mW}$ und zeigt so in Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen (Kapitel 11.4.3), dass bei sehr massiven Eisanlagerungen die Isolationswirkung den Effekt der Oberflächenvergrößerung überwiegt und so die benötigte Heizleistung, dem physikalischen Modell entsprechend, unter den Referenzwert abfällt.

Im Vergleich dieser Messungen mit den Ergebnissen der Simulation Oberflächenvergrößerung (Abb. 33, blau) zeigt sich, dass beide Graphenverläufe übereinstimmen.

Fazit

13. Zusammenfassung

Die Kernaufgabe dieser Bachelorarbeit war, zu evaluieren, ob eine Eisdetektion aufgrund des thermischen Widerstandes einer Eisanlagerung durchführbar ist. Zusätzlich wurde als weiterer Aspekt untersucht, in wie weit eine Eisdickenbestimmung möglich ist. Zudem wurden die thermischen Prozesse in numerischen FEM-Analysen aufgezeigt und verschiedene Konzepte und Ausführungsformen vorgestellt.

Laut dem physikalischen Modell (Kapitel 5.2), steigt bei einer Eisanlagerung, aufgrund des eingebrachten thermischen Widerstandes zwischen Heizelement und Umwelt, die Sensortemperatur bzw. wird diese konstant gehalten, ruft das Eis einen Heizleistungsabfall hervor. Bei allen Simulationen, mit Ausnahme der zur Überprüfung des Oberflächeneinflusses, liegt dieser Trend unabhängig von der verwendeten Ausführungsform vor.

Schon eine dünne Eisschicht verursacht eine Vergrößerung der Grenzfläche und sorgt so bei einer konstanten Sensortemperatur für einen sprunghaften Anstieg der benötigten Heizleistung. Dieser Effekt der Oberflächenvergrößerung überkompensiert bis zu einer bestimmten Eisdicke den durch den Wärmewiderstand induzierten Heizleistungsabfall.

In den Simulationen und bei den Messungen mit dem Prototypen im Enteisungsprüfstand hat sich herausgestellt, dass der Detektor auf beide Effekte reagiert. Zum einen kann ein Heizleistungsabfall durch die Isolationswirkung des Eises hervorgerufen werden, welcher bei zunehmender Eisdicke an Einfluss gewinnt. Zum anderen wird durch den Effekt der Oberflächenvergrößerung die benötigte Heizleistung erhöht. Dieses Phänomen ermöglicht, dass der Detektor verlässlich auf dünne Eisschichten ansprechen kann.

Obwohl eine Detektion von atmosphärischem Eis aufgrund der Veränderung des Wärmewiderstandes möglich ist, ist offenbar die Ausnutzung des Effektes der Oberflächenvergrößerung zur Eiserkennung besser geeignet. Der entworfene Prototyp ist für beide Einflüsse sensitiv und so in der Lage die Anwesenheit des Eises bei dünnen Eisschichten von unter einem Millimeter robust durch einen signifikanten Heizleistungsanstieg von etwa 300 mW zu erkennen (Abb. 44). Bei den Temperaturmessungen im Vorfeld konnte nach Auswertung der Messwerte des Prototypen bei deaktivierter Heizleistungsregelung und einer Eisanlagerung ein merklicher Temperaturabfall um etwa 1 K festgestellt werden (Abb. 42). Der Detektor kann also den sprunghaften Heizleistungsanstieg, hervorgerufen durch den Effekt der Oberflächenvergrößerung, nutzen, um eine dünne Eisschicht zu detektieren und den dann folgenden Heizleistungsabfall für die Ermittlung der Eisdicke, über den zusätzlichen Wärmewiderstand des Eises, verwenden.

Da beide Effekte entgegenwirken, gibt es eine bestimmte Eisdicke, bei der, der entzogene Wärmestrom (zusätzliche Oberfläche), den eingesparten Wärmestrom (Isolationswirkung) gerade aufhebt. Somit ist der Wert der Heizleistung bei dieser Eisdicke mit dem ohne Eis identisch. Bei den Simulationen trat diese Uneindeutigkeit bei 6,5 mm Eis (Abb. 33) auf.

Neben der Eisdetektion wurde auch überprüft, ob eine Eisdickenbestimmung durchführbar ist. Die mit dem Prototypen bestimmten Messergebnisse zeigen einen abfallenden Trend der Heizleistung bei konstanter Sensortemperatur mit zunehmender Eisdicke (Abb. 44). Für eine verlässliche Eisdickenbestimmung wäre jedoch eine genauere Eisdicken-Messung für das Erstellen der Referenzwerte vorteilhaft. Diese stellte sich wegen der Gestalt des Eises (Abb. 40) als größtes Hindernis bei den Eignungsprüfungen heraus.

Die Heizleistungsmessung bei variabler Eisdicke wird bei der Simulation der Oberflächenvergrößerung nachgebildet. So konnte gezeigt werden, dass die Simulationsergebnisse die Realität hinreichend abbilden und dass neben dem thermischen Widerstand auch tatsächlich die Oberflächenvergrößerung die Einflussgröße ist, die die Heizleistung mitbestimmt. Zieht man in Betracht, dass es sich bei der Simulation um eine Vereinfachung handelt, decken sich die Simulationsergebnisse gut mit den Messergebnissen. So konnte festgestellt werden, dass nicht nur das Eis, welches sich direkt über dem Messteller befindet, einen Einfluss hat, sondern die Gesamtheit der Eisanlagerung. Für eine realitätsnahe Simulation muss deswegen die gesamte Eismasse nachgebildet werden.

Das in Hinblick auf die Fertigung des Prototypen gewählte Konzept eines heizleistungsgeregelten Eisdetektors hat sich als funktionsfähig erwiesen. Andere Konzepte, die Materialien mit geringen Wärmeleitfähigkeiten verwenden oder die Sensorposition andersartig angebracht haben, sind nicht zu bevorzugen. Die Heizpatrone als Verbund aus Heizelement und Temperatursensor hat sich aufgrund der Einfachheit als guter Ausgangspunkt bewährt, obgleich sich für die spätere Anwendung speziell angepasste Heizelemente und Temperatursensoren anbieten würden. Obwohl die Regelung der Heizleistung zu einem höheren Aufwand bei der Messdatenauswertung führt, ist sie für die Kontrolle über den Temperaturgradienten nötig. Sollte es gut realisierbar sein, das Heiz- durch ein Kühlelement zu ersetzen, könnte sich dieses Konzept ebenfalls als nützlich erweisen, da die Eisbildung hierbei am kälteren Messteller startet und man so einen zeitlichen Vorsprung bei der Detektion erhält.

Bei den Simulationen hat sich gezeigt, dass ausgehend von der gleichen Heizpatrone die Einflussparameter der Leistung vor allem durch die Geometrie der gut wärmeleitenden Komponenten bestimmt werden. Veränderungen an der Heizpatrone wurden nicht untersucht, da sonst die Einflussparameter der veränderten Hülse nicht eindeutig identifiziert werden könnten. Der Leistungsfähigkeit des Detektors kommt eine besonders geringe Masse zugute, da so die Trägheit des Systems gering gehalten wird. Durch das Einbringen von höher leitfähigen Materialien kann der Wärmefluss im Detektor optimiert werden. Der Wärmefluss in der thermischen Reihenschaltung zwischen Heizelement und Umgebungsluft sollte ungehindert fließen. Dazu tragen ein höher leitfähiger Lanzenkern und

ein Messteller mit einer größeren Kontaktfläche bei. Essentiell für den Detektor ist, dass der Wärmefluss so gestaltet ist, dass sich der Sensor innerhalb des Temperaturgradienten befindet und möglichst nah am Eis liegt.

Nach der Auswertung der Simulation hat sich gezeigt, dass bei höheren Heizleistungen bei einer Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten größere absolute Temperaturunterschiede auftreten. Die maximale Heizleistung wird durch das Erreichen des Gefrierpunktes und durch die Isolation des Detektors limitiert. Die Isolation muss das Innere des Detektors gegen unerwünschte äußere thermische Einflüsse abschirmen, darf aber im Gegenteil nicht zu einem Überhitzen des Detektors führen.

Die Schwachstelle des Konzeptes ist die Notwendigkeit nach Referenzwerten. Diese müssen verlässlich und über den gesamten Funktionsbereich des Flugzeuges gültig sein. Sie müssen vor dem Einsatz für jede Position an jedem Flugzeugtyp neu aufgenommen und im System hinterlegt werden. Außerdem liegt eine Abhängigkeit gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit und der Differenz aus Sensor- und Umgebungstemperatur vor, was den Bedarf nach aktuellen Umweltdaten weckt. Zur Eisdickenbestimmung werden ebenfalls Referenzwerte benötigt, welche die Heizleistung in Verbindung zu der Eisdicke setzen. Das Problem des Bedarfs nach Referenzwerten kann evtl. durch die Ermittlung dieser über Simulationsreihen verringert werden.

Die Reglerparameter sind ebenfalls von der Windgeschwindigkeit abhängig und müssen, da die Leistungsfähigkeit der Regelung für die des Detektors maßgeblich ist, in Echtzeit angepasst werden. Zudem kann die Regelung wegen der Heizpatrone nur ein Heizen jedoch kein Kühlen bewirken und so ist die Abkühlrate alleinig von den Umweltbedingungen abhängig. Der Nachteil, dass ein Temperaturgradient am Sensor vorliegen muss, kann durch geeignete Wahl der Solltemperatur umgangen werden. So ist es nicht nur wie bei den durchgeführten Tests möglich eine konstante Solltemperatur zu wählen, sondern eine festgelegte Temperaturdifferenz herstellen zu lassen. Hierbei ergibt sich die Schwierigkeit, dass die Regelung nicht nur auf gutes Störverhalten, sondern auch auf gutes Führungsverhalten auszulegen wäre.

Der Vorteil ist eine robuste Eisdetektion an einer Stelle, die tatsächlich überwacht werden soll, aber ohne, dass dabei die Strömungseigenschaften verändert werden. So kann der Detektor bündig in die Flügelvorderkante eingelassen werden ohne die Umströmung zu stören und dadurch eine Verschlechterung der Energieeffizienz des Flugzeuges zu bewirken. Zudem kann dieser Detektor aufgrund seines geringen Gewichtes (Prototyp: <17 g) und der geringen Materialkosten (Prototyp: <150 €) mehrfach am Flugzeug verbaut werden, um so die Verteilung des Eises am Flugzeug zu bestimmen. Das Hezelement benötigt nur eine geringe Leistung (Prototyp: <3,2 W), je nach Soll- und Umgebungstemperatur unterschiedlich und muss nicht genutzt werden, um den Detektor zu enteisen, damit er wieder messfähig wird. Des Weiteren ist das System, falls keine Beschädigungen auftreten, wartungsfrei. Außerdem dürfte es nachrüstbar sein. Zudem bietet dieses Detektorsystem gegenüber dem Bekannten den Vorteil, dass es keine Betriebsphasen gibt in denen der Detektor messunfähig ist.

14. Ausblick

Zwar konnte in dieser Arbeit der Beweis erbracht werden, dass eine Eisdetektion mittels des thermischen Widerstandes des Eises möglich ist, jedoch besteht der Bedarf nach weiteren Untersuchungen und einer Weiterentwicklung des Detektorsystems, damit dieses vollständig autonom genutzt werden kann.

Es gibt derzeit noch keine automatisierte Merkmalerkennung. Diese zu implementieren, um die Eigenständigkeit des Systems zu prüfen, wäre notwendig. Dazu müssten die Messwerte in Echtzeit ausgewertet werden können und dann die entsprechenden Eis- und Betriebswarnungen ausgegeben werden. Hierfür wären weitere Messreihen zur Erstellung verlässlicher Referenzwerte nötig und Modifikationen der Hülse, die den Prototypen der Anwendungsausführung angleichen, könnten eine Leistungsverbesserung bewirken. Zudem wäre eine besser ausgelegte Heizleistungsregelung für die Messdatenauswertung förderlich.

Es wäre interessant zu untersuchen, wie der Detektor auf eine mechanische Beanspruchung (Wärmeausdehnung, Biegung, Erschütterungen, Schwingungen) der Flügelvorderkante reagiert und wie man den Detektor an dem Übergang zur Außenluft gestalten könnte, damit er möglichst wenig durch Luftreibung oder Verwitterung verschleift. Man könnte den Heizpatronenmantel teilweise oder vollständig entfernen und die veränderten thermischen Prozesse analysieren, um herauszufinden, wie das schlecht leitende Material des Mantels den Wärmefluss beeinflusst. Eine Simulation mit mehreren Variationen der Heizpatrone bei gleichbleibender restlicher Detektor-Geometrie könnte ermitteln, welche Merkmale ein besonders gut geeignetes Heizelement aufweisen müsste. Außerdem wäre interessant mittels einer Simulation den Einfluss des Effektes der Oberflächenvergrößerung an der Anwendungsausführung zu bestimmen. Vergleichsmessungen zu Simulationen der Referenzwerte könnten klären, ob es möglich ist für eine bestimmte Position an einem Flugzeug die benötigten Umwelt- und Eisreferenzwerte mittels einer Simulation zu erhalten. Zeichnet man den Verlauf der Eisansammlung mit einer Kamera seitlich am Profil auf, kann man diese Informationen für eine realitätsgetreue Nachbildung des Eises bei einer Simulation zur Untersuchung des Effektes der Oberflächenvergrößerung nutzen.

Praktische Untersuchungen zu den Auswirkungen von Anti-Ice-Beschichtungen des Messstellers auf die Leistungsfähigkeit des Detektors wären interessant, ebenso wie den Einfluss von Verschmutzungen oder von Enteisungsmitteln am Messsteller zu ermitteln. Es wäre auch zu untersuchen wie sich verschiedene Eisarten auf die Funktion des Detektors auswirken und ob der Detektor messfähig bleibt, falls eine thermische Enteisung durchgeführt wird. Aufgrund der geringen Baugröße, dem geringen Energiebedarf und der Möglichkeit einer drahtlosen Informationsübertragung, könnte dieses System auch in den Rotorblättern von Hubschraubern oder in Propellern Einsatz finden. Es wäre interessant zu untersuchen, ob der Detektor miniaturisiert werden kann.

Ein bionischer Ansatz zur Realisierung oder Optimierung des Detektors erweist sich als schwierig. Die hier vorliegenden Randbedingungen einer kühlen starren Oberfläche, die sich mit hoher Geschwindigkeit durch eine mit unterkühltem Wasser angereicherte Atmosphäre bewegt und dabei Eis ansammelt, findet sich in der Natur nicht. Tiere und Pflanzen versuchen normalerweise ein Unterkühlen ihres Körpers zu vermeiden und daher tritt keine Vereisung eines Gewebes ein, solange die Lebewesen noch lebendig bzw. bei Bewusstsein sind. Da es zur Funktionsuntüchtigkeit der Organe kommt, bevor die Körperflüssigkeiten gefrieren, stellt sich einem Organismus die Notwendigkeit zur Eisdetektion nicht.

Ausnahme bilden hier die Waldfrösche, *Rana sylvatica*, welche durchaus zeitweilig einfrieren und dies überleben [25]. Da jedoch der Körper des Frosches nicht aus starrem totem Material besteht, wird die Vereisung offenbar indirekt durch die Verlangsamung des Herz-Kreislauf-Systems, temperaturempfindliche Nervenzellen und eine zunehmende Steifigkeit registriert.

Es gibt zum Schutz vor Erfrierungen spezielle Natriumkanäle, die sich beim Unterschreiten von 10°C öffnen und Aktionspotenziale auslösen [36]. Es handelt sich hierbei also um eine Temperaturmessung und keine direkte Erkennung des Eises.

Die Merkmalerkennung mittels bionischer Methoden zu gestalten wäre beispielsweise durch künstliche neuronale Netzwerke möglich. So könnte eine Veränderung in den Werten frühzeitig und robust erkannt werden. Ein bionischer Aspekt könnte auch durch bionisch inspirierte Temperatursensoren eingebracht werden, beispielhaft lassen sich hier Infrarot-Sensoren nennen. Da der Detektor kaum mechanischen Lasten unterliegt bietet sich ein bionischer Leichtbau-Aspekt nicht zur Verbesserung des Detektors an.

Zwar könnte man Komponenten mittels bionischen Methoden optimieren, jedoch würde es sich dabei nicht um Bionik, sondern nur um die Anwendung eines bionischen Konzeptes, handeln.

Addendum

A. Fertigung

A.1. Vermessung der Heizpatronen

Der Pt100 und das Heizelement der drei Heizpatronen, werden mitsamt Kabel bei Raumtemperatur durchgemessen, um ihren Verwendungszweck festzulegen.

Tabelle 1: Verwendungszuordnung der Heizpatronen; Messung bei RT und mit Kabel

Heizpatrone	R_{el} Heizelement	R_{el} Pt100	Verwendung
1	872 Ω	110,1 Ω	Detektorbau
2	851 Ω	110,1 Ω	CT-Scan & Reserve
3	851 Ω	110,0 Ω	Halbierung & Vermessung

A.2. Komponenten-Fertigung

Die einzelnen Komponenten werden in der internen Werkstatt gefertigt und im Enteisungsprüfstand eingebaut (Abb. 45).

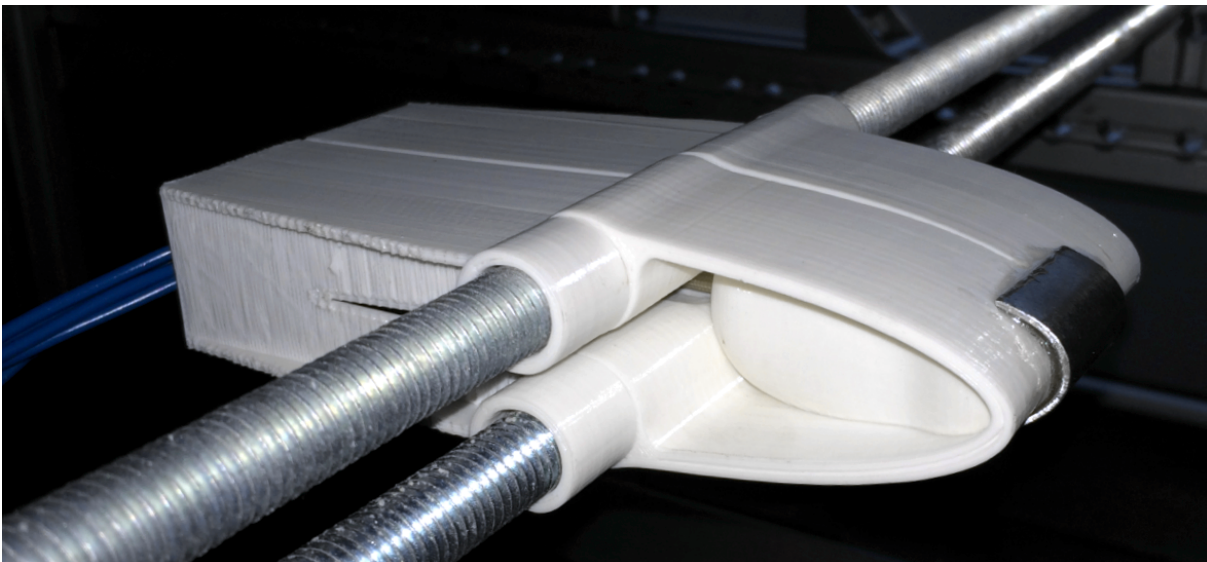


Abbildung 45: Foto des im Enteisungsprüfstand eingebauten Prototypen

Verlängerungskabel Die sechs Verlängerungskabel à 8 m werden auf die gleiche Länge gebracht, indem sie an einem Ende im Schraubstock eingespannt und dann gleichsam lang gezogen werden. Die Enden werden beidseitig abgeschnitten und die Kabel mit einem Multimeter nachgemessen. Der Widerstand aller Kabel beträgt je $0,15 \Omega$.

Messteller Aus einem 1 mm dicken Aluminiumblech wird mit einer Umlauf-Bandsäge ein 26,25 mm breiter Streifen abgeschnitten. Dieser wird händisch mittels einer Vorlage in die Form der Flügelvorderkante gebogen. Die überstehenden Enden werden abgetrennt und die Kanten entgratet. Die Form wird mit der des Profils abgeglichen.

restliche Hülse Aus einem Aluminiumblock mit den Abmessungen $9,9 \times 9,9 \times 36,2 \text{ mm}^3$ wird die Hülse gefertigt. Zuerst wird die Kontur des Messtellers an einer Stirnseite des Block herein gefeilt, um ihn dort später anzubringen. Auf der gegenüberliegenden Seite wird eine Bohrung mit einem Durchmesser von 6,5 mm, einer Maximaltiefe von 30 mm und einer Randtiefe von 28 mm eingelassen. Eine Stufenbohrung ist nicht nötig. Die übrigen vier Längskanten werden rund gefeilt und anschließend auf der Drehbank in zwei Schritten rundgedreht.

Fügen der Leitungskomponenten Die Heizpatrone wird am Boden und etwa 12 mm am unteren Mantel flächendeckend mit Wärmeleitpaste bestrichen. Es ist darauf zu achten, dass mindestens bis über die heizverstärkte Zone der Heizpatrone Wärmeleitpaste vorhanden ist. Der kegelförmige Raum am Boden der Bohrung sollte mindestens gefüllt sein. Die hintere Mantelfläche der Heizpatrone wird ebenfalls etwa 12 mm mit 2-Komponenten-Epoxidharz-Kleber bestrichen. Nun kann die Heizpatrone in die Bohrung gepresst werden. Es ist darauf zu achten, dass die komplette Luft, die sich zwischen den Bauteilen einschließen könnte, entweichen kann. Ein Teil der Wärmeleitpaste und des Klebers quellen heraus und werden anschließend entfernt.

Zur Befestigung des Messtellers an der Hülse wird die Kontaktfläche beidseitig mit Wärmeleitpaste bedeckt, die Teile gefügt und die dabei überschüssige Menge entfernt. Auch hier dürfen keine Luftblasen vorhanden sein. Am Rand der entstandenen Kontaktfläche wird eine Klebenaht gelegt. Die Klebeverbindungen an den Leitungskomponenten sollten ausreichend aushärten bis sie benutzt werden können. Die Rückseite der Heizpatrone wird durch eine Klebeschicht gegen eindringende Feuchtigkeit geschützt.

Gussform Die Gussform wird aus PLA mit einem thermoplastischen Drucker (*MakerBot Replicator 2*) im FDM-Verfahren gefertigt. Dabei wird die Gussform so positioniert, dass möglichst wenig Stützmaterial benötigt wird (Abb. 46). So werden die beiden Spitzen der späteren Kontaktstellen zwischen Flügelvorderkante und Gussform als Auflageflächen gewählt. Die Wand der Gussform besteht aus zwei Schichten PLA, was einer Wandstärke⁷ von 0,8 mm entspricht. So hat sie ein geringes Gewicht von 6,24 g. Um die Isolationswirkung der inneren Luftkammer nicht zu verschlechtern, wurde ohne Füllmaterial⁸ gedruckt.

⁷ Die Wandstärke wurde an einem Testdruck mit gleichen Einstellungen gemessen.

⁸ Es ist möglich den Innenraum prozentual mit einer automatisch generierten Wabenstruktur zu füllen.

Nur eine Schalenkonstruktion kann bei so geringen Wandstärken die nötige Eigenstabilität bieten. Beim Untertauchen unter Wasser konnten keine Luftblasen entdeckt werden, die Gussform ist also luftdicht.

Kabelverbindung Die Kabel der Heizpatrone werden so kurz wie möglich abgeschnitten und dann über Stecker mit den Verlängerungskabeln verbunden. Über die zweiteiligen Stecker kann der Detektor auf einfache Weise von den Verlängerungskabeln getrennt werden und bei dem Pt100 geht hier die Zweileiter- in eine Vierleiterschaltung über. Die Verlängerungskabel werden mit dem Steuer-, Regel- und Datenerfassungssystem (*National Instruments CompactRIO*) verbunden.

Flügelvorderkante Im FDM-Verfahren wird der vordere Teil eines *NACA 0012* Profils mit 30 cm Länge in zwei Hälften aus PLA gedruckt. Die Form kann auf zwei M12-Gewindestangen gesteckt werden und so im Enteisungsprüfstand angebracht werden. Die Flügelvorderkante ist 1,84 mm dick und 60,1 mm breit. Sie besitzt am Rand eine Versteifungsrippe.

Kabelhalterung Da die Kabelverbindungen auf der Rückseite des Detektors austreten und dort die Stecker gehalten werden, wird dafür eine weitere Halterung gedruckt. Diese besteht auch aus mehreren Teilen, um einfacher an den Gewindestangen angebracht werden zu können. Damit die Halterung bedingt vor Wasser geschützt wird, ist sie auf Klebeband angewiesen. Die Verlängerungskabel treten an der Rückseite aus und werden seitlich an den Gewindestangen aus der Messkammer geleitet.

A.3. Gewichtsbilanz

Es wird eine Gewichtsbilanz der am Prototypen verwendeten Materialien aufgestellt:

Tabelle 2: Gewichtsbilanz eines Detektors ohne Kabel, bestimmt am Prototypen

Bauteil	Gewicht	
Gussform	+	6,24 g
Heizpatrone ohne Kabel	+	4,99 g
Hülse ohne Messteller	+	3,21 g
Messteller	+	1,39 g
Kleber	+	0,34 g
Wärmeleitpaste	+	0,38 g
Überschüssiges (Kleber/Wärmeleitpaste)	−	0,19 g
Summe	=	16,36 g

Anhang



Abbildung 46: Fotos von dem Prototypen: Gussform während des FDM-Drucks (oben links), Leitungskomponenten (oben rechts), fertig gedruckte Gussform (unten links), Prototyp angebracht im EPS (unten rechts)

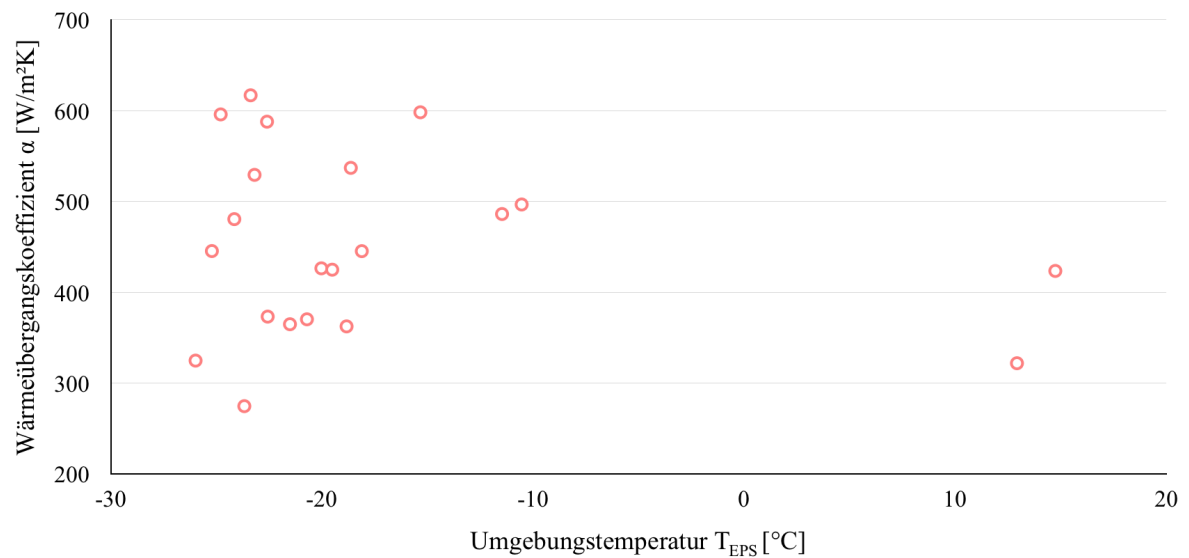


Abbildung 47: Temperaturunabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten, am Prototypen bestimmt

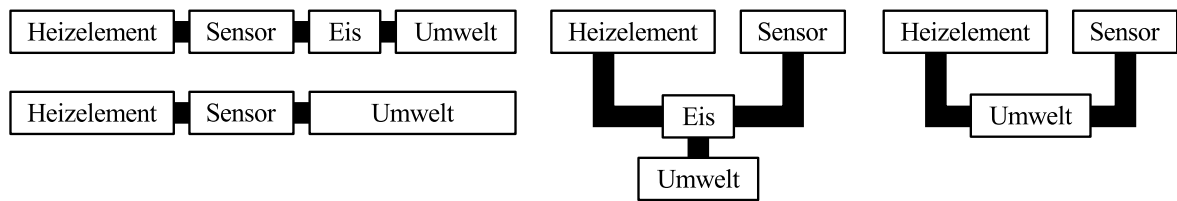


Abbildung 50: Thermische Reihenschaltung in I-Form (links) und U-Form (rechts) je mit und ohne Eis

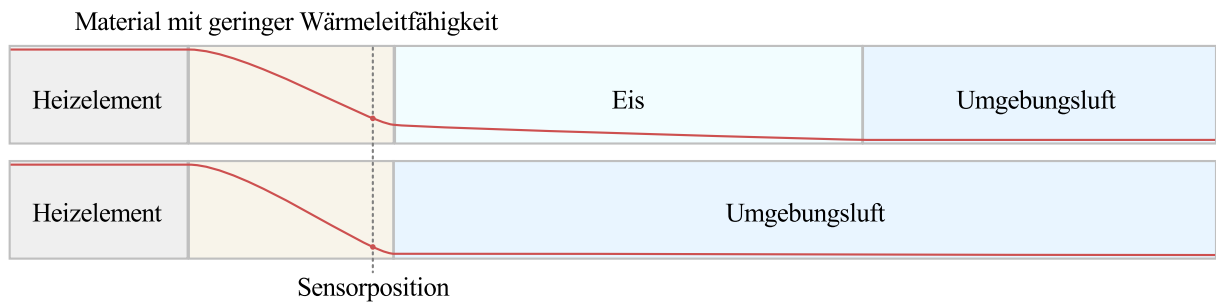


Abbildung 51: Schematischer Temperaturverlauf (rot) bei Material geringer Wärmeleitfähigkeit, nur ein geringer Temperaturunterschied an der Sensorposition

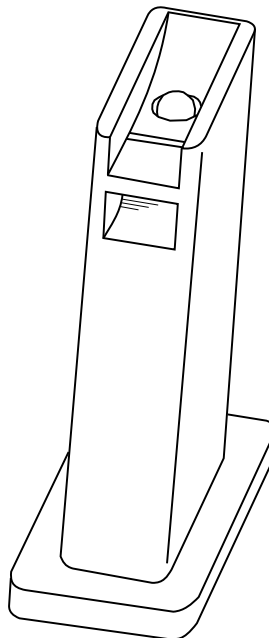


Abbildung 52: Supercooled Large Droplet Ice Detector, Öffnung an der Vorderseite mit Verbindung zum dünnen Spalt vor dem rundlich dargestellten Sensor, [21] verändert

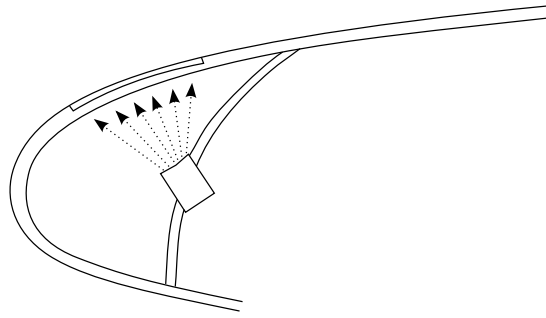


Abbildung 53: Infrared Ice Detector, Pyrometer zur Temperaturmessung an der Profilinnenoberfläche, [19] verändert

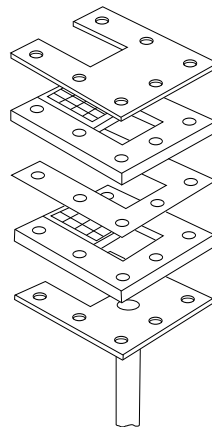


Abbildung 54: Heat Transfer Coefficient Ice Detector, die beiden karierten Bereiche zeigen die Lage der Wärmepumpe an, durch den Hohlraum in der Mitte kann das zu untersuchende Medium strömen, [11] verändert

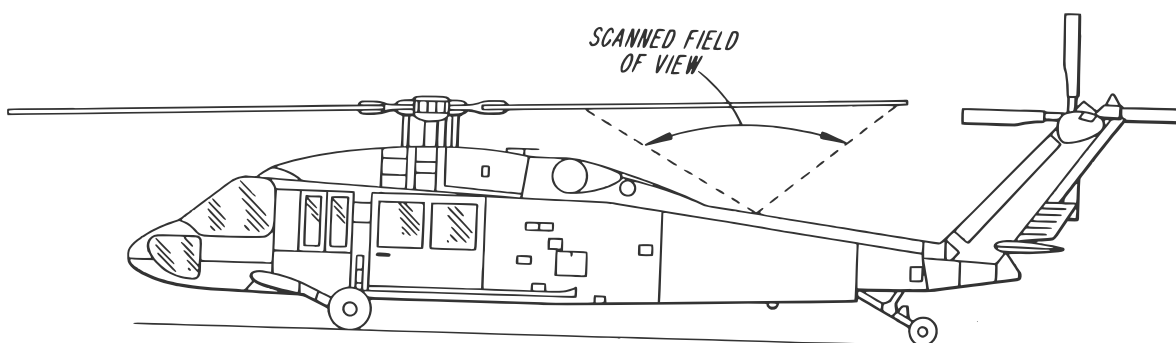


Abbildung 55: Heat of Fusion Ice Detector, Infrarot Kamera zur Überprüfung der Anwesenheit eines Temperaturgradienten am Rotorblatt, überwachter Bereich eingezeichnet, [16] verändert

Tabelle 3: Morphologischer Kasten des Detektors, gewählte Ausprägungen der *Anwendungsausführung* und des Prototypen

Komponente	Merkmal	Ausprägung A	Ausprägung B	Ausprägung C
Heizpatrone	Lage Position Ausrichtung Schaltung Sensor	<u>innenliegend</u> <u>zentriert</u> <u>gerade</u> <u>Vierleiter</u> <u>Pt100</u>	eben mit Profil oben zeigt nach oben Zweileiter Pt1000	außenliegend unten zeigt nach unten Dreileiter
Isolation	Zustand Material Applikation Form Gussform	<i>vorhanden</i> <i>PU</i> <u>Gussform</u> schmale Kuppel <u>doppelwandig</u>	<u>abwesend</u> PTFE auftragen <u>breite Kuppel</u> einfache Wand	Styrodur zuschneiden keine
Profilloch	Durchmesser	<i>Lanze</i>	<u>Hülse</u>	Teller
Messteller	Kontur Form Randerhöhung Lage Material	gerade <i>rund</i> vorhanden <u>außen</u> <u>Aluminium</u>	<u>gebogen</u> <u>eckig</u> <u>abwesend</u> <i>eben im Profil</i> Kupfer	<i>Profilform</i> oval
Lanze	Zustand Kern Material	<i>vorhanden</i> <i>vorhanden</i> Aluminium	<u>abwesend</u> abwesend <i>Kupfer</i>	
Bypass	Länge Material	kurz <u>Aluminium</u>	halbe Patrone Kupfer	<u>ganze Patrone</u>
Stützstruktur	Zustand Material Position	vorhanden Edelstahl stehend	<u>abwesend</u> Aluminium hängend	beides
Dichtungen	Zustand	vorhanden	<u>abwesend</u>	
Wärmeleitpaste	Zustand	<u>vorhanden</u>	abwesend	
Fügen	Methode	<u>Kleben</u>	Stecken	Gewinde



Abbildung 56: Klareisbildung am Prototypen ohne Hornbildung

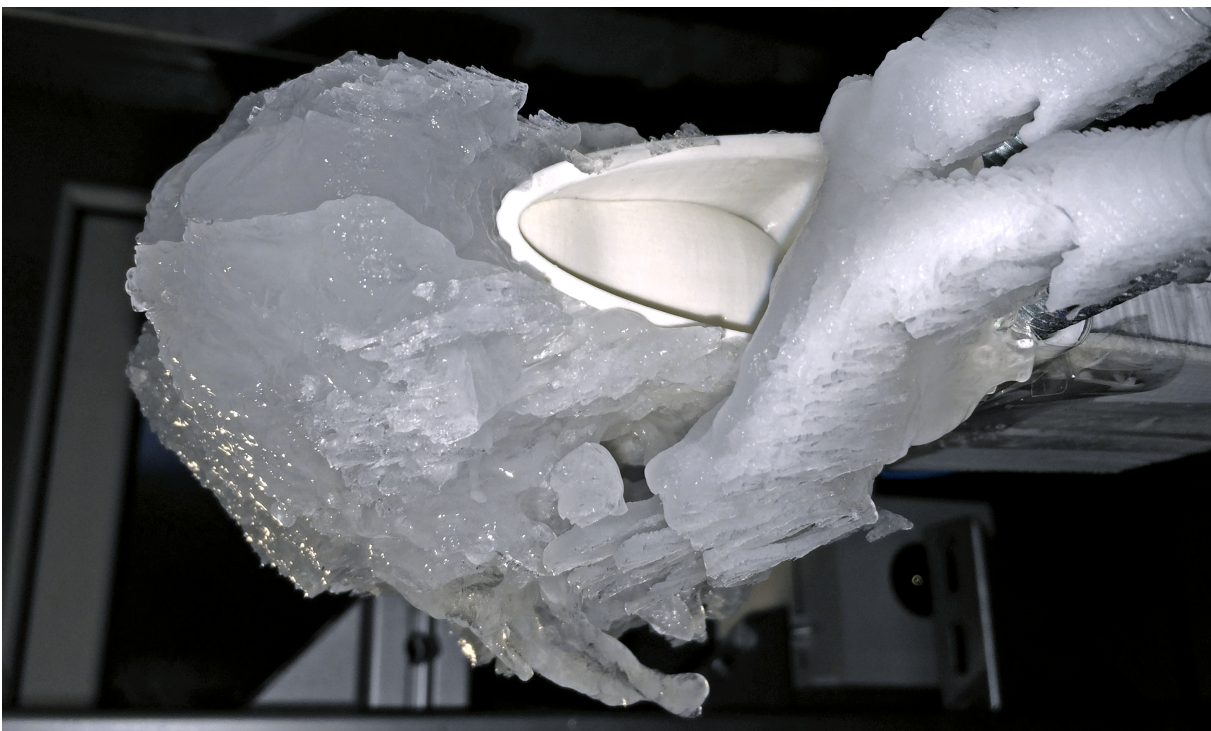


Abbildung 57: Raueisbildung (4 cm) am Prototypen nach Wassereinspritzung (10 min)

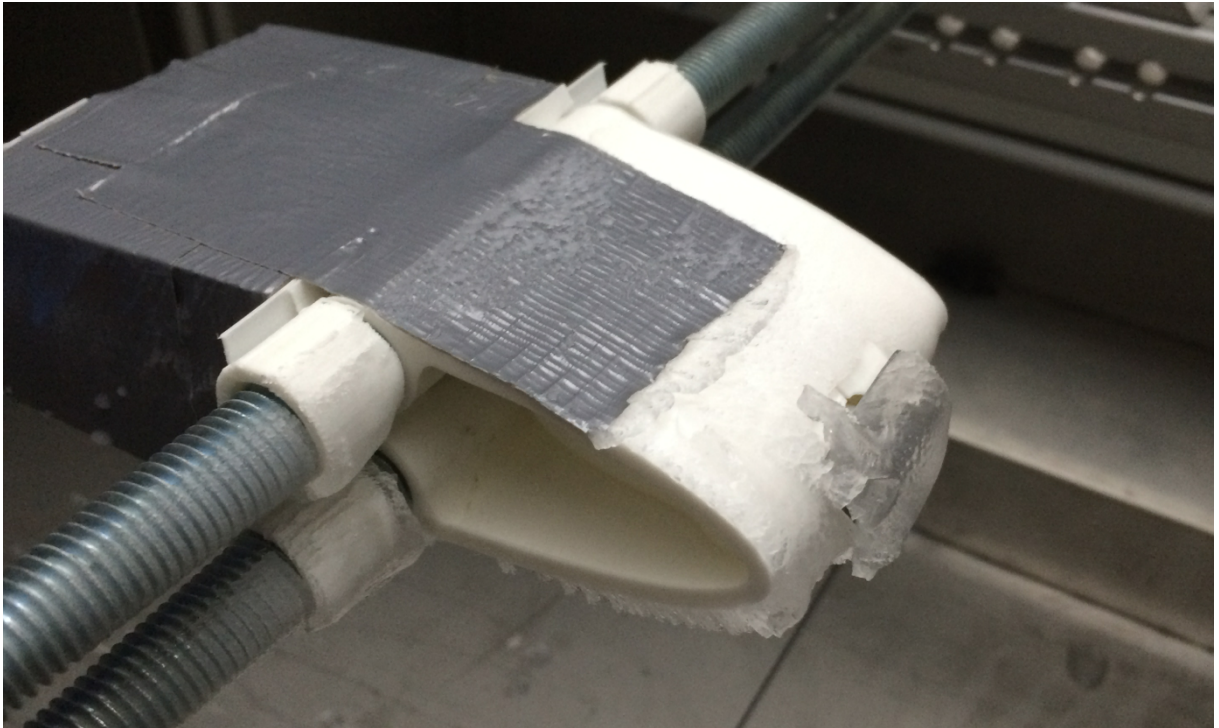


Abbildung 58: Eisanlagerung befindet sich überwiegend auf der Messtelloberfläche

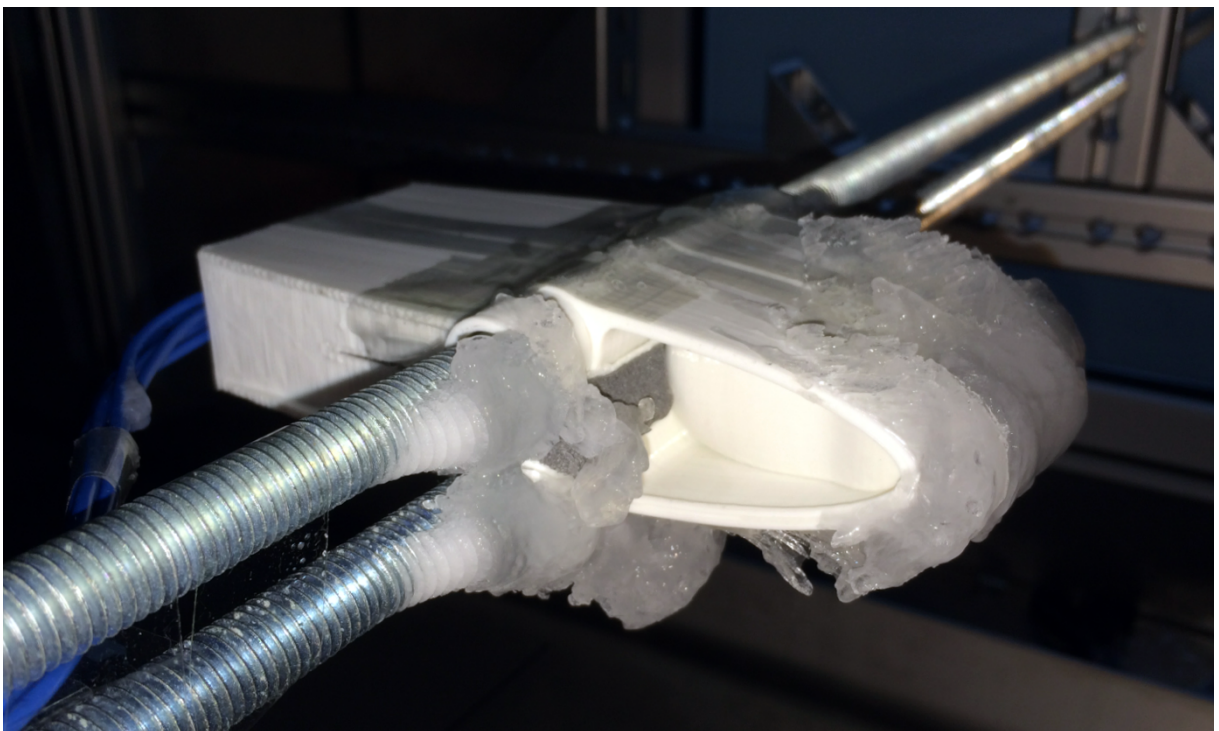


Abbildung 59: Eisanlagerung erstreckt sich über die Messtelloberfläche hinaus



Abbildung 60: Abgelöste Eisanlagerung mit Abdruck des Messtellers

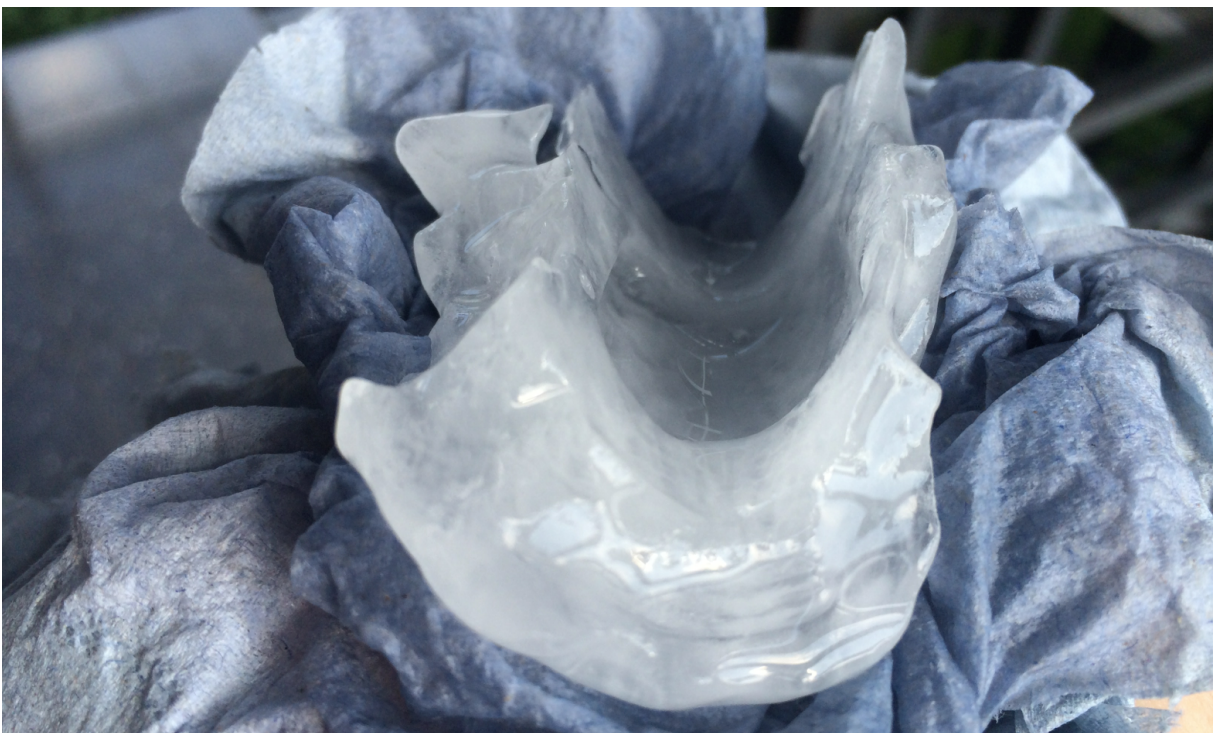


Abbildung 61: Form der Flügelvorderkante in der abgelösten Eisanlagerung erkennbar

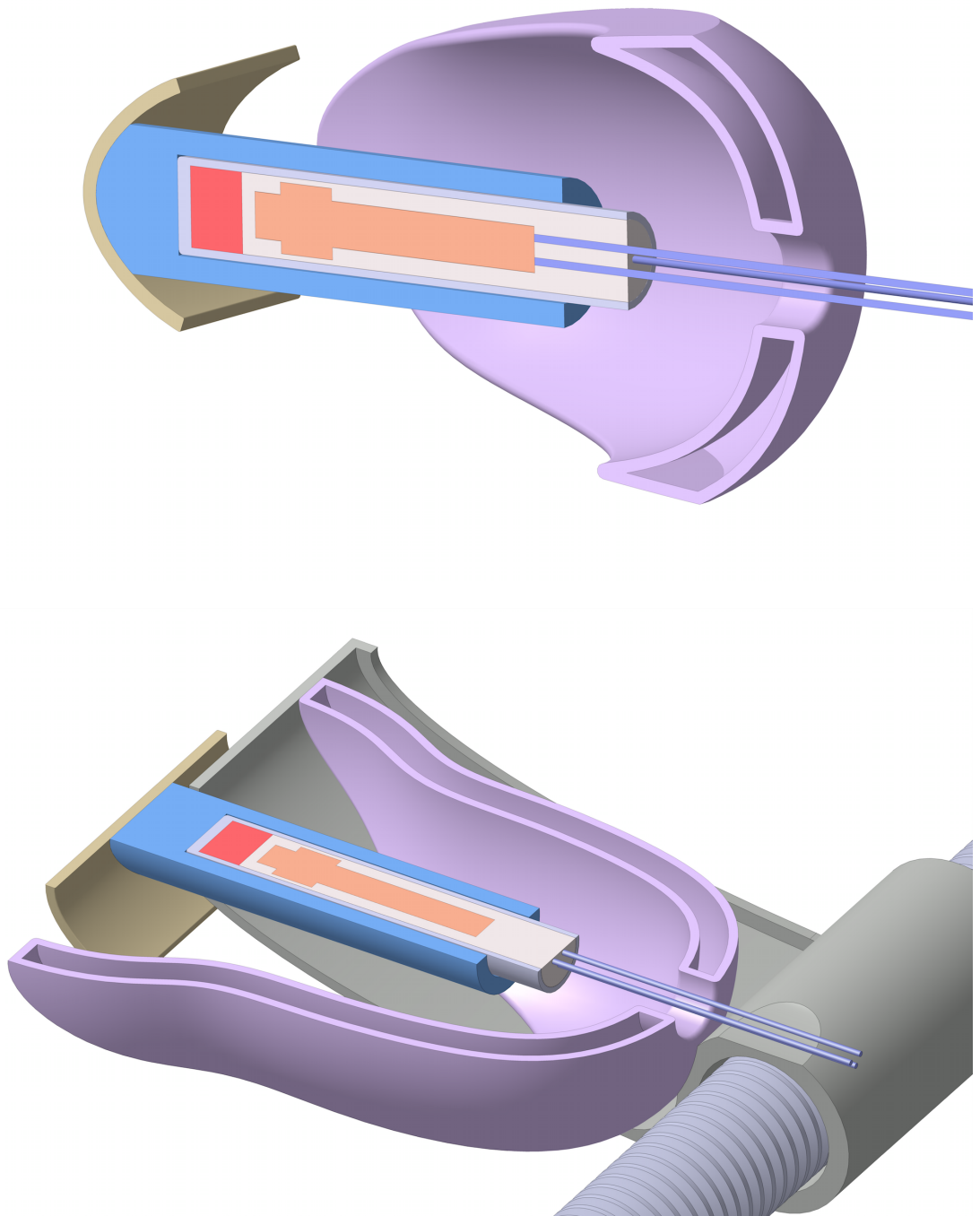


Abbildung 62: Laborausführung (XZ-Schnitt) (oben) und (XY-Schnitt) (unten)

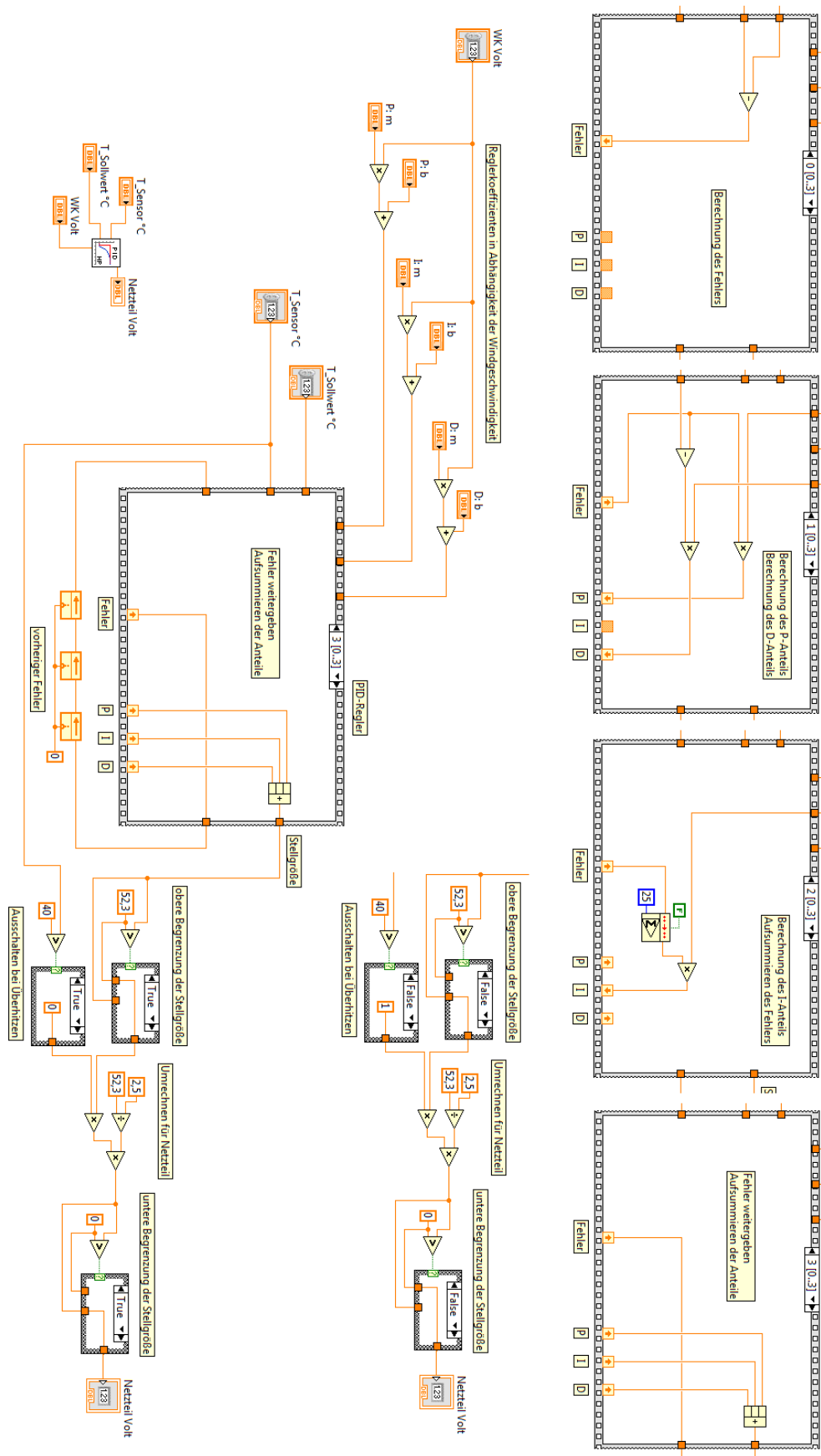


Abbildung 63: PID-Regler-VI, vollständiges Blockdiagramm

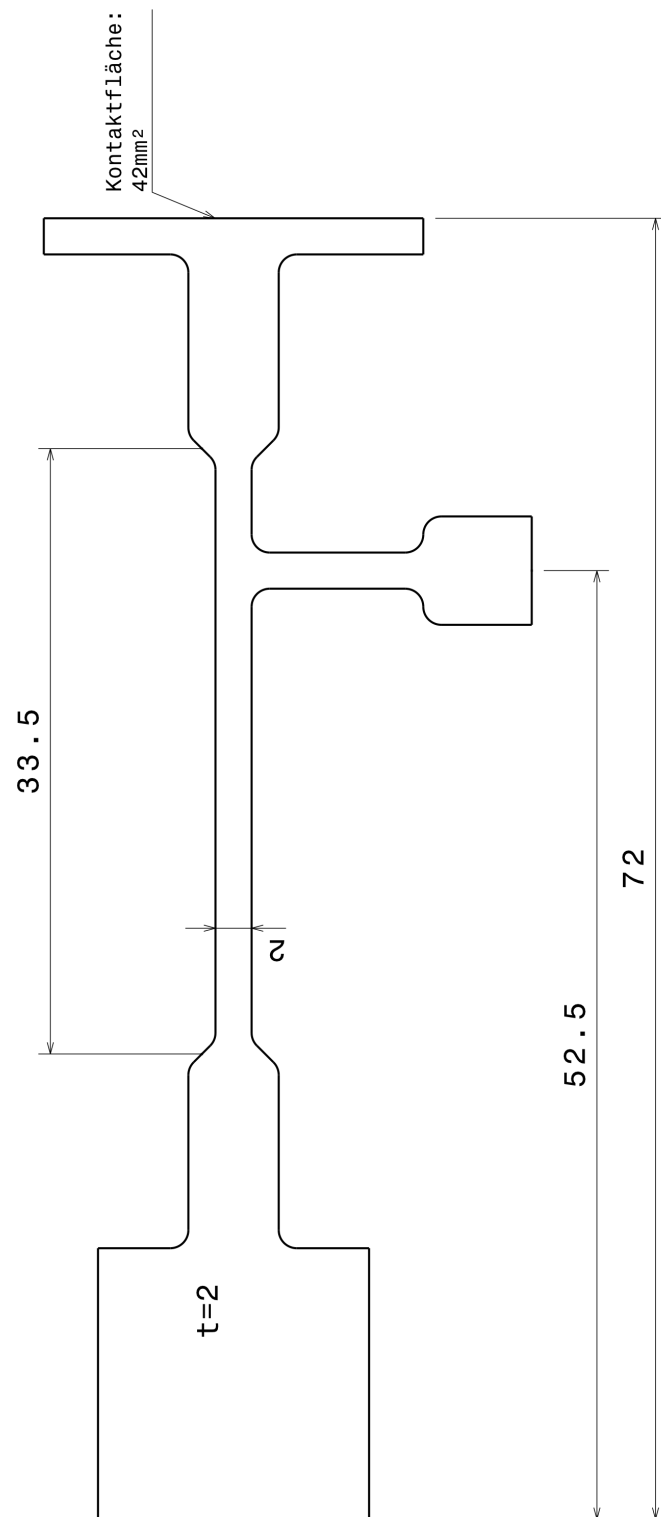
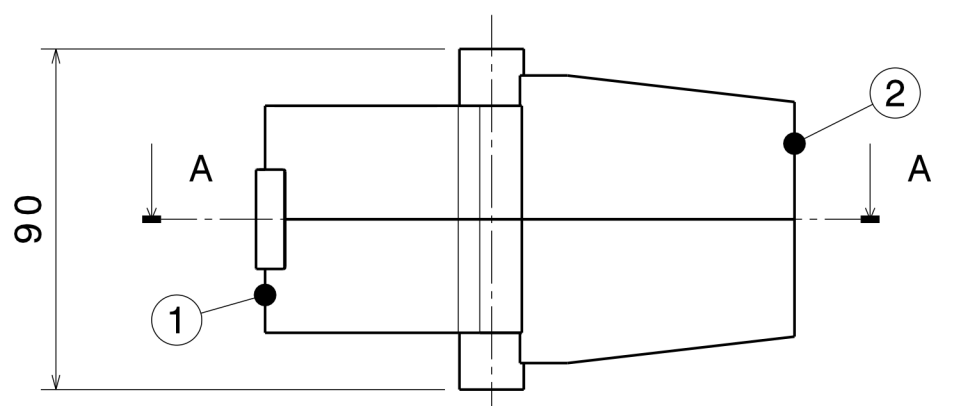
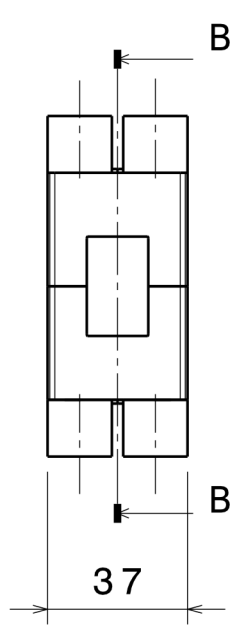


Abbildung 64: Abmaße der Simulationsausführung, Maße in mm

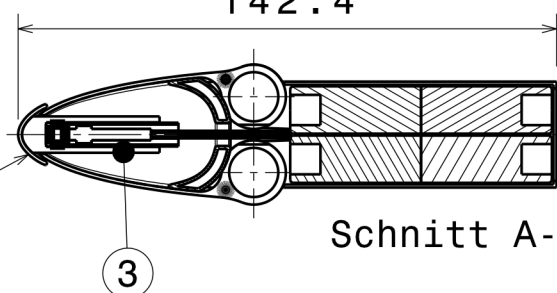
1	2	3	4
---	---	---	---



142.4

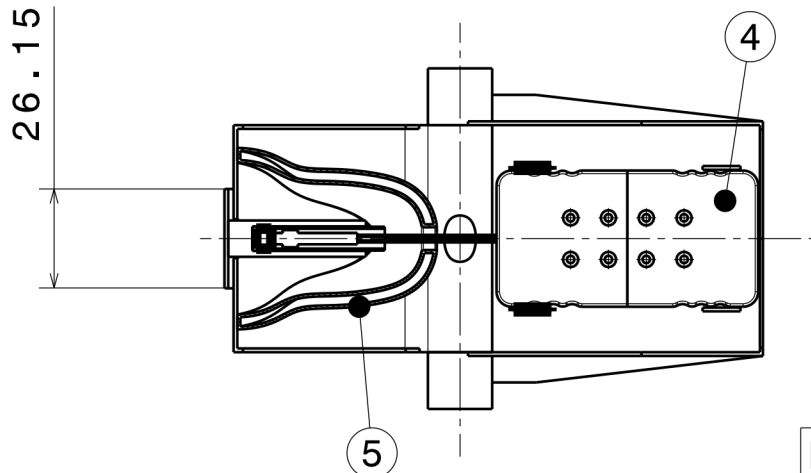


Fläche
599,581mm²

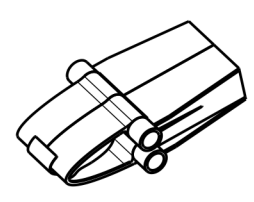


Schnitt A-A

26.15

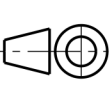



Schnitt B-B

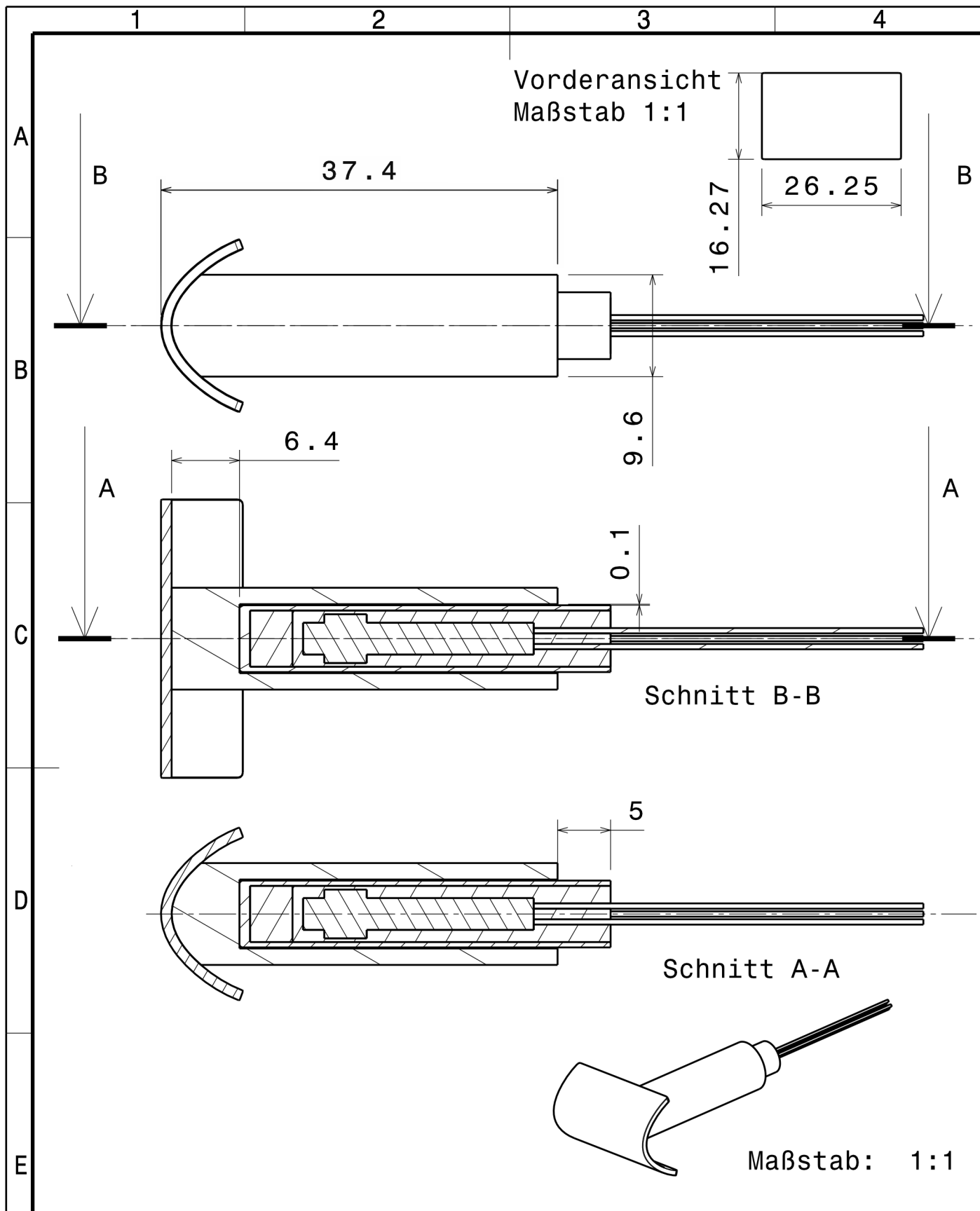


Maßstab: 1:5

Nr.	Bezeichnung
1	Profil
2	Halterung
3	Leitungskomp.
4	Stecker
5	Gussform

						Maßstab 1:2	(Gewicht) x g
				Werkstoff:			
				Bear.	Datum	Name	<p style="font-size: 1.2em; margin: 0;">Laborausführung</p> <p style="font-size: 1.2em; margin: 0;">Eisdetektor</p>
				Gepr.	31.07.14	Minder-	
				Norm		mann	
							Blatt
				<p style="font-size: 0.8em;">Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft</p>			B1.
00	Erstellung	31.07.14	Min				
Zust	Änderung	Datum	Nam.	Urspr.	(Ers.f.:)	(Ers.d.:)	A4

	1			2			3			4		
A												
B												
C												
	Schnitt A-A											
D												
	Schnitt B-B											
E												
							Maßstab 1:1			(Gewicht) 6,24 g		
							Werkstoff: PLA Halbzeug:					
					Bear. 01.08.14 Gepr. Norm		Datum 01.08.14 Name Minder- mann		Gussform			
									Blatt B1.			
					Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft							
F	00	Erstellung	01.08.14	Min								
	Zust	Änderung	Datum	Nam.	Urspr.	(Ers.f.:)			(Ers.d.:)			A4



				Maßstab 2:1		(Gewicht) x g
				Werkstoff:		
				Halbzeug:		
				Hülse und Heizpatrone Laborausführung		
				Blatt		
				B1.		
00	Erstellung	01.08.14	Min	Deutsches Zentrum DLR für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft		
Zust	Änderung	Datum	Nam.	Urspr.	(Ers.f.:)	(Ers.d.:)
						A4

1	2	3	4
---	---	---	---

Schnitt A-A

Nr.	Bezeichnung
1	Messteller
2	Lanze
3	Bypass
4	Lanzenkern
5	Mantel
6	MgO-Isolation
7	Temp.Sensor
8	Heizelement

				Maßstab 2:1	(Gewicht) x g																																
				Werkstoff: Halbzeug:																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																		Bear. Gepr. Norm	Datum 11.08.14	Name Minder- mann	Anwendungsausführung Leitungskomponenten
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. <small>in der Helmholtz-Gemeinschaft</small>				Blatt . B1.																																	
00	Erstellung	11.08.14	Min																																		
Zust	Änderung	Datum	Nam.	Urspr.	(Ers.f.:) (Ers.d.:)																																

A4

Literaturverzeichnis

Bücher

- [1] Böckh, Peter von und Wetzel, Thomas; 2014; *Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis*; 5. Auflage; Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg Verlag; Kapitel 5.2.1; Seite 149
- [2] Christen, Daniel S.; 2005; *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik - Handbuch für Chemiker und Verfahreningenieure*; 1. Auflage; Berlin, Heidelberg: Springer Verlag; Kapitel 23; Seite 636
- [3] Grote, Karl-Heinrich und Feldhusen, Jörg; 2007; *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*; 22. Auflage; Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag; Kapitel D25; Absatz 9.2
- [4] Lide, David R. [Hrsg.]; 2005; *CRC Handbook of Chemistry and Physics* [online] 85. Auflage; Boca Raton, FL, USA: CRC Press; Kapitel 6-7 *Properties of ice and supercooled water*; <http://www.hbcnetbase.com> [28.07.2014]
- [5] Oertel Jr., Herbert [Hrsg.]; 2012; *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre - Grundlagen und Phänomene*; 13. Auflage; Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag; Kapitel 4.3; Seiten 169
- [6] Rossow, Cord-Christian; Wolf, Klaus und Horst, Peter; 2014; *Handbuch der Luftfahrzeugtechnik*; 1. Auflage; München: Hanser Verlag; Kapitel 7.9.2; Seite 763
- [7] Strohrmann, Günther; 1991; *Automatisierungstechnik*; Band II: *Stellgeräte, Strecken, Projektabwicklung*; 2. Auflage; München, Wien: R. Oldenbourg Verlag; Kapitel 5.1; Seiten 212-213
- [8] Tipler, Paul A. und Mosca, Gene; 2009; *Physik - Für Wissenschaftler und Ingenieure*; 6. deutsche Auflage; Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag; Kapitel 20.4; Seiten 781-789

Patente

- [9] Anderson, Mark und Meiners, Larry; 2002; *Electro-optic ice detection device*; Pat. US6425286
- [10] Anderson, Roger D. und Woytassek, Mark A.: Rockwell Collins Inc.; 2000; *System for detecting ice on an aircraft*; Pat. US6166661
- [11] Baker, Michael James: Hawker Siddeley Dynamics Ltd.; 1976; *Verfahren und Vorrichtung zum Feststellen eines knapp bevorstehenden Phasenwechsels*; Pat. DE2620052
- [12] Blackwood, Carl I. R.: Loral Aerospace Corp.; 1993; *Apparatus and method for ice detection*; Pat. US5243185

- [13] Codner, Gerald Willey; Pruzan, Daniel A. und Rauckhorst III, Richard Lawrence; Reich, Allen Donald und Sweet, David Bert: The B. F. Goodrich Company; 1999; *Impedance type ice detector*; Pat. US5955887
- [14] Corbi, Ronald W.; 1997; *Ice detection method and apparatus for an aircraft*; Pat. US5621400
- [15] Dehn, Rudolph Albert und Macdonald, Andrew John: General Electric Co.; 1991; *System und Verfahren zum Melden der Vereisung, insbesondere eines Propellerblattes*; Pat. DE4023982
- [16] Dershowitz, Adam L. und Hansman Jr., Robert J.: Massachusetts Institute of Technology; 1994; *Method of and apparatus for detection of ice accretion*; Pat. US5313202
- [17] Gerardi, Joseph J.; Dahl, Philip R. und Hickman, Gail A.; 1993; *Smart skin ice detection and de-icing system*; Pat. US5206806
- [18] Larue, Francois und Bisson, Jerome: Intertechnique Plaisir; 1998; *Ultraschallverfahren und -vorrichtung zum Nachweis und zur Identifizierung von Verunreinigungsstoffen zum Beispiel der Eisbildung auf der Oberfläche einer Struktur*; Pat. DE69405799
- [19] Latrille, Martin; Orawetz, Holger; Reppe, Matti und Roth, York Caesar: Airbus Deutschland GmbH, Airbus France SAS; 2010; *Vorrichtung und Verfahren zur Kontrolle einer Enteisungsvorrichtung an einem Strukturbauteil eines Flugzeugs*; Pat. DE102008063408
- [20] Magenheimer, Bertram: System Development Corp.; 1977; *Mit Mikrowellen arbeitender Eis-Detektor*; Pat. DE2713081
- [21] Otto, John Timothy: Rosemount Aerospace Inc.; 2001; *Supercooled Large Droplet Ice Detector*; Pat. US6269320
- [22] Zinsstag, Hermann und Bottger, Rudolf: Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt e.V. in Berlin-Adlershof; 1937; *Gerät zur Messung eines Eisansatzes*; Pat. DE653506

Computer Programme und Emails

- [23] AnSys Inc.; 15. Oktober 2013 20:46; *AnSys ® WorkbenchTM 2.0 Framework* (15.0.0.685484) [Computer Programm] AnSys Materialbibliothek; ANSYS SAS IP, Inc.
- [24] Mendig, Christian; christian.mendig@dlr.de; 2014; *Dynamische Viskosität von Luft* [email] Nachricht an Mindermann, Pascal (pascal.mindermann@dlr.de) gesendet am Freitag 4. April 2014 15:11

Paper

- [25] Costanzo, J. P., do Amaral, M. C. F., Rosendale, A. J. und Lee, R. E., Jr; 2013; Hibernation physiology, freezing adaptation and extreme freeze tolerance in a northern population of the wood frog; *The Journal of Experimental Biology*; 216; Seiten 3461-3473
- [26] Politovich, M. K.; 2003; Aircraft Icing; *Encyclopedia of Atmospheric Science*; 1; Seiten 68-75; Elsevier Science
- [27] Szilder, K.; Lozowski, E. P. und Gates, E. M.; 1987; Modelling ice accretion on non-rotating cylinders - The incorporation of time dependence and internal heat conduction; *Cold Regions Science and Technology*; 13; Seiten 177-191; Elsevier Science Publishers B.V.

Abschlussarbeiten

- [28] Lancaster, Glenn T.; 2008; *A process for ice detector placement using 3-D eulerian droplet impingement analysis*; [Master] The University of Texas at Arlington
- [29] Mortensen, Kasper; 2008; *CFD Simulations of an Airfoil With Leading Edge Ice Accretion*; [Master] Technical University of Denmark

Konferenz Berichte

- [30] Li, Wei; Zhang, Jie; Ye, Lin und Zhang, Hong; 2009; *A Fiber-Optic Solution to Aircraft Icing Detection and Measurement Problem*; 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science; Kiev: 25. - 26. Juli 2009; New York City: IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers
- [31] Sherif, S.A. und Pasumarthi, N.; 1995; *Local heat transfer and ice accretion in high speed subsonic flow over an airfoil*; 30th American Institute of Aeronautics and Astronautics Thermophysics Conference; San Diego: 19. - 22. Juni 1995; Washington D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics

Vorlesungsskripte

- [32] Deicher, Manfred; 2006; Platin-Widerstandsthermometer; *Grundpraktikum Physik* [online] Universität des Saarlandes; http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/scripts/Platin_Widerstandsthermometer.pdf [21.08.2014]
- [33] Postel, Johannes; 2011; 70 Jahre Reglereinstellung nach Ziegler und Nichols; *Proseminar Technische Informationssysteme* [online] Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik; http://www.inf.tu-dresden.de/content/institutes/iai/tis-neu/lehre/archiv/folien.ws_2011/Vortrag_Postel.pdf [01.08.2014]
- [34] Redlich, Detlef; 2012; Schaumstoff als Federelement; *Geräteelemente* [online] FH Jena; http://www.fh-jena.de/fhj/etit/fb/homepage/home-redlich/lehre/elemente/Documents/Feder_Schaumstoff.pdf [10.08.2014]

Websites

- [35] Airfoil Investigation Database; 2013; *NACA 0012 Airfoils* [online] <http://www.airfoildb.com/foils/435> [28.07.2014]
- [36] Bild der Wissenschaft; 2007; *Schmerzkanal für den Notfall* [online] http://bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/index2.php?object_id=31172278 [27.08.2014]
- [37] Ebersbach, Ulrike; 2006; *Absorption von Wärmestrahlung* [Portable Document Format] (27.08.04) <http://www.imn.htwk-leipzig.de/~ebersb/bauphysik/lehrblatt/lehrblatt3.pdf> [19.08.2014]
- [38] Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG; 2011; *Pt100 ist nicht gleich Pt100* [online] (01.04.2011) <http://www.de.endress.com/eh/sc/europe/dach/de/home.nsf/#page/pt100> [19.08.2014]
- [39] Korth Kristalle GmbH; 2014; *Magnesiumoxid (MgO) Material Detailansicht* [online] <http://www.korth.de/index.php/material-detailansicht/items/22.html> [28.07.2014]
- [40] Marti, Othmar; 2001; *Wetterphänomene - Troposphäre* [online] (20.10.01) <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/marti/Zawiw/Texte/MetElem/wetterelemente2.htm#Tropo> [19.08.2014]
- [41] Mehl, Leslie und Parsons, Annie; 2014; *Aircraft Anti-Icing Systems* [PowerPoint Präsentation] http://www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/AntiIcingT4.ppt [21.08.2014]
- [42] Plumley, Phil; 2011; *de-ice and anti-ice systems* [Portable Document Format] (13.04.2011) <http://ftpcabair.files.wordpress.com/2011/04/ice-protection-v73.pdf> [01.08.2014]
- [43] Quadrant Engineering Plastic Products; 2011; *ERTALON® 6 PLA Data Sheet* [Portable Document Format] (25.01.11) http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/GEP/Ertalon_6_PLA_PDS_D_21012013.pdf [28.07.2014]
- [44] Schmidt-Lademann, Frank-Peter; 2004; *Aerodynamik - Flugzeugkunde - Instrumentenkunde - Das Flugklare Flugzeug* [PowerPoint Präsentation] (13.01.2004) fsvwaechtersberg.de/fpsl/download/technik.ppt [21.08.2014]
- [45] UTC Aerospace Systems; 2014; *Ice Detection and Protection Systems* [online] <http://utcaerospacesystems.com/cap/products/Pages/ice-detection-protection-systems.aspx> [09.08.2014]

Publikationen

- [46] Knoll, Steffen; 2014; *Untersuchung zur Detektion und Rekonstruktion von durch Vereisung degradierten Sensorsignalen* (Institutsbericht IB 111-2014/03) [online] Braunschweig; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Flugsystemtechnik, Abteilung Flugdynamik & Simulation: <http://elib.dlr.de/88039/> [28.07.2014]
- [47] Krutina, Michael F. H.; 2006; *Flugmeteorologie* (Vortrag) [online] Achim; VHS Darmstadt: http://www.wolkenschnueffler.de/media//DIR_62701/55f8ee87b0cfff79ffff80e4ac144225.pdf [27.07.2014]
- [48] Mingione, Giuseppe; Barocco, Massimo; Denti, Eugenio und Bindi, Francesco Giuseppe; *Flight in icing conditions* (Bericht) [online] Direction Generale de l'Aviation Civile, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali, Associazione Nazionale Piloti Aviazione Civile, University of Pisa: http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGAC_Icing_flight_manual.pdf [01.08.2014]
- [49] Pavlow, Sally; 2010; *Aircraft Icing* (Vortrag) [online] National Oceanic and Atmospheric Administration: http://www.crh.noaa.gov/images/lmk/Brian%20S/LMK_Icing_Show.pdf [27.07.2014]

öffentliche Berichte

- [50] Federal Aviation Administration; 1993; *Aircraft Ice Detectors and Related technologies for Onground and Inflight Applications*; Atlantic City International Airport: Federal Aviation Administration Technical Center
- [51] Luftfahrtbundesamt; 1981; *Flugsicherheitsmitteilung 2/81 Vereisung*; Flughafen Braunschweig: Luftfahrtbundesamt
- [52] National Advisory Committee for Aeronautics; 1943; *Wartime Report: An Investigation of aircraft heaters - A Simplified Method for the Calculation of the unit thermal conductance over wings*; Langley Field: NACA Library - Langley Memorial Aeronautical Laboratory
- [53] National Aeronautics and Space Administration; 2007; *Large and Small Droplet Impingement Data on airfoils and Two Simulated Ice shapes*; Cleveland: Glenn Research Center

Abbildungsverzeichnis

1.	Kritische Bereiche einer Vereisung	3
2.	Vereisungspotenzial für Flugzeuge, temperaturabhängig	5
3.	Windgeschwindigkeitsabhängigkeit der Eisart	5
4.	Veränderung der Kräfteverhältnisse aufgrund einer Eisanlagerung	6
5.	Aerodynamische Auswirkung einer Klareisanlagerung	7
6.	Schematischer Temperaturverlauf, physikalisches Prinzip	15
7.	Modell der Simulationsausführung	18
8.	Modell der Anwendungsausführung	19
9.	Modell der Laborausführung (Prototypen)	21
10.	Funktionsschema des Detektorsystems	23
11.	Integrationsbeispiel des Detektorsystems	25
12.	Temperaturbereiche des Detektorsystems	26
13.	Wärmestromdichte am Profil, Messungen der NACA	27
14.	Aerodynamische Verhältnisse am umströmten Profil	29
15.	Aerodynamische Grenzschicht	30
16.	Verteilung des Wärmeübergangskoeffizienten über der Profiloberfläche	30
17.	Berechnung des Temperaturanstiegs aus Messwerten	31
18.	Windgeschwindigkeitsabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten	32
19.	Simulation verschiedener Eisdicken zur Machbarkeitsprüfung	32
20.	Simulation einer Eisanlagerung: Temperaturanstieg	33
21.	Simulation des Konvektionsabfalls: Temperaturanstieg	34
22.	Konvektionsabfall: Temperatur und Spannungsveränderung im Vergleich	35
23.	Regelkreis der Heizleistungsregelung	37
24.	Mikroskopaufnahme der Heizpatrone	40
25.	CT-Scan, mehrere Ansichten	41
26.	Explosionsgrafik: simulationstaugliches Heizpatronenmodell	43
27.	Simulationsversion des Prototypen	45
28.	Vernetzung des Prototypenmodells	46
29.	Wärmestromdichte- und Temperaturverlauf, Prototyp	47
30.	Höchste Wärmestromdichte, Isoflächen Messteller, Prototyp	48
31.	Temperaturkennfläche des Prototypen, simuliert	49
32.	Oberflächenvergrößerungseffekt des Eises am Prototypen, simuliert	50
33.	Simulation Oberflächenvergrößerung, Ergebnisse	51
34.	Simulationstaugliches Modell der Anwendungsausführung	52
35.	Wärmestromdichte- und Temperaturverlauf, Anwendungsausführung	53
36.	Wärmestromdichtebereiche, Anwendungsausführung	54
37.	Temperatur-Isoflächen, Anwendungsausführung	54
38.	Temperaturkennfläche der Anwendungsausführung, simuliert	55
39.	Vergleich des Prototypen mit der Anwendungsausführung	56
40.	Raueisbildung am Prototypen	58
41.	Windgeschwindigkeitsabhängigkeit der Temperaturerhöhung, Messung	59
42.	Temperaturerhöhung bei variabler Eisdicke, Messung	60
43.	Temperaturdifferenzabhängiger Heizleistungsanstieg, Messung	61

44.	Eisinduzierter Heizleistungsanstieg, Messung	63
45.	Prototyp, Foto	A
46.	Fotos von dem Prototypen	D
47.	Temperaturunabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten	D
48.	Gleichwarmer Sensorbereich	E
49.	Anwendungsausführung (XY-Schnitt)	E
50.	Thermische Reihenschaltung in I-Form und U-Form	F
51.	Temperaturverlauf eines Konzeptes mit geringer Leitfähigkeit	F
52.	Supercooled Large Droplet Ice Detector Schema	F
53.	Infrared Ice Detector Schema	G
54.	Heat Transfer Coefficient Ice Detector Schema	G
55.	Heat of Fusion Ice Detector Schema	G
56.	Klareisbildung am Prototypen ohne Hornbildung	I
57.	Extreme Raueisbildung	I
58.	Eisanlagerung ohne Oberflächenvergrößerung	J
59.	Eisanlagerung mit Oberflächenvergrößerung	J
60.	Abgelöste Eisanlagerung	K
61.	Abgelöste Eisanlagerung, seitlich	K
62.	Laborausführung in zwei Schnittansichten	L
63.	PID-Regler Blockdiagramm	M
64.	Simulationsausführung, Abmaße	N
65.	Technische Zeichnung, Prototyp, Zusammenbau	P
66.	Technische Zeichnung, Gussform	R
67.	Technische Zeichnung, Hülse und Heizpatrone, Prototyp	T
68.	Technische Zeichnung, Leitungskomponenten, Anwendungsausführung . . .	V

Tabellenverzeichnis

1.	Verwendungszuordnung der Heizpatronen	A
2.	Gewichtsbilanz eines Detektors	C
3.	Morphologischer Kasten des Detektors	H

Benutzte Hilfsmittel

(nach Wichtigkeit sortiert)

- *CATIA* ® *Service Pack 8, Build Number 18* (5.18) 2. Juni 2009 22:00; Dessault Systems
- *AnSys* ® *WorkbenchTM 2.0 Framework, CFX und Mechanical* (15.0.0.685484) 15. Oktober 2013 20:46; AnSys SAS IP, Inc.
- *LabVIEWTM 2012 Service Pack 1* (12.0.1) National Instruments; LabVIEW Full Development System
- *Microsoft* ® *Office* (14.0.7128.5000) Microsoft Corporation
- *iWork: Pages (5.2), Numbers (3.2)* 10. Februar 2013; Apple Inc.
- *Pixelmator* (3.2 Sandstone 40509) 25. Mai 2014 15:41; Pixelmator Team Ltd.
- *Inkscape* (0.48.2) Free Software Foundation Inc.
- *TeXShop* (3.11) 11. April 2013 18:26; Koch, Richard

Produkte und Lieferanten

Heizpatrone

3mal:

Hochleistungsheizpatrone mit integriertem Pt100
6,3×35mm 60W, 230V

Messpunkt am Boden, Hitzebeständiger CrNi-Stahl, Patronenboden gasdicht geschweißt, korrosionsbeständig, Oberfläche geschliffen und metallisch rein, Anschlussseite mit Keramikabschluss, hochverdichtetes Magnesiumoxid Isolationsmaterial, NiCr 80/20 Heizleiter, silikonimprägnierte Glasseidennickellitze, maximale Oberflächenbelastung 50 W/cm²

Heinz Stegmeier GmbH - HS Heizelemente
Annastraße 27 - 78567 Fridingen
www.hs-heizelemente.de

Wärmeleitpaste

2mal:

Hochleistungswärmeleitpaste

Keratherm ® KP12

Kerafol KP12

silikonfrei, 10 W/mK, -60°C bis 150°C, Inhalt 4,2 g

Conrad Elektronik Onlineshop

www.conrad.de

2K-Kleber

bereits vorliegend:

UHU Kleber Plus Sofortfest

lösungsmittelfreier 2-K-Epoxidharzkleber

Mischungsverhältnis 1:1

Topfzeit 2min

UHU

www.uhu.com

PLA Filament

bereits vorliegend:

PLA FDM Filament

Frosty White TM, 1,75 mm

Drucktemperaturen $\approx 180^{\circ}\text{C}$ - 200°C

SpreadForms

3D-Printing Materials & Manufacturing

www.spreadforms.com

Westfälische Hochschule
Abteilung Bocholt

Fachbereich Maschinenbau

Name: *Mindermann*

Vorname: *Pascal*

Matrikel-Nr.: *201127136*

Ich versichere, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen und bei Zitaten kenntlich gemachten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Braunschweig, den 29. August 2014

Unterschrift des Studenten

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, dass meine Bachelorarbeit in der Bibliothek ausgelegt wird, nachdem alle Prüfungen mit mindestens ausreichend bewertet worden sind.

Braunschweig, den 29. August 2014

Unterschrift des Studenten